www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 23, 1961, no. 11 blz. 341-380 Verschenen 19 Maart 1962

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

DE NEUTRONENBUIS, EEN EENVOUDIGE EN COMPACTE NEUTRONENBRON

door O. REIFENSCHWEILER *) en K. NIENHUIS **). 621.387:539.125.5

De ongekende opbloei van de kernfysica en de kerntechniek in de laatste jaren en de centrale positie van het neutron in de kernfysica hebben geleid tot een groeiende vraag naar neutronenbronnen. Diverse soorten neutronenbronnen zijn geconstrueerd om aan die vraag te voldoen, er ontbrak tot nog toe echter een eenvoudige, compacte en verplaatsbare bron voor de produktie van snelle monochromatische neutronen. In het onderstaande artikel wordt een afgesmolten „neutronenbuis" besproken die hierin voorziet en waarvan de constructie en de wijze van gebruik in sommige opzichten overeenkomen met die van een röntgenbuis. De buis kan continu ongeveer 10^8 neutronen per seconde leveren. Interessant is, dat F. M. Penning — o.a. bekend door zijn manometer voor hoogvacuüm — reeds in 1937 een experimentele neutronenbuis gemaakt had, hoewel hij deze niet verder heeft ontwikkeld.

De ontdekking van het neutron (1932) is van fundamentele betekenis geweest voor de ontwikkeling van de kernfysica, en er zijn en worden dan ook talrijke onderzoekingen verricht naar de eigenschappen van dit elementaire deeltje en naar zijn wisselwerking met de materie. Ook in de kerntechniek, die de laatste jaren uit de kernfysica is gegroeid, neemt het neutron een centrale plaats in. In de kernreactor is het neutron het agens dat bij de kernsplijting de reactie van atoomkern naar atoomkern overbrengt. Vele radioactieve isotopen, die men voor het onderzoeken (of beïnvloeden) van technische, chemische en biologische processen wil gebruiken, kunnen met behulp van neutronen worden geproduceerd; enz.

Experimenten met neutronen zijn derhalve tegenwoordig van belang voor vele takken van natuurwetenschap en techniek. Hierbij kan men het uiteraard niet stellen zonder bronnen waaruit men de gewenste neutronen verkrijgt. In dit artikel willen we de constructie en de werking beschrijven van een buis die neutronen levert, maar die wat betreft constructie en gebruik lijkt op een röntgenbuis. De ontwikkeling ervan heeft plaatsgevonden in het Philipslaboratorium te Eindhoven [1]) en is te beschouwen als een wederopneming van het in 1937 door F. M. Penning in dit laboratorium verrichte werk [2]). In samenwerking met de Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen is de ontwikkeling daarna zover voortgezet dat produktie in serie mogelijk is. Aan het slot geven we een overzicht over de toepassingsmogelijkheden van zulk een neutronenbuis.

Neutronenleverende kernreacties; neutronenbronnen

Daar neutronen in het algemeen alleen voorkomen als bestanddeel van atoomkernen, kan men ze slechts vrij maken door middel van een kernreactie. Een neutronenbron is dan ook in principe een toestel waarin een geschikte kernreactie teweeggebracht wordt. Dit kan b.v. geschieden met behulp van een bundel snelle kernen van waterstof (protonen) of helium (alpha-deeltjes). De kinetische energie van deze deeltjes moet groot zijn, omdat een kernreactie slechts kan plaatsvinden als een deeltje in staat is een atoomkern zeer dicht te naderen. Het moet daartoe de afstotende coulombkracht tussen de kernen overwinnen. In het algemeen varieert de vereiste kinetische energie met de kernreactie die men teweeg wil brengen.

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.
**) Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen, Philips, Eindhoven.

[1]) Eerder is over dit werk iets meegedeeld op de in 1957 te Heidelberg gehouden Deutsche Physikertagung: O. Reifenschweiler en A. C. van Dorsten, Eine abgeschmolzene Neutronenröhre, Phys. Verh. (Mosbach) jaarg. 1957, 163 (no. 8). Voor een uitvoerige behandeling van alle problemen en de oplossing daarvan, zie O. Reifenschweiler, Philips Res. Repts. **16**, 401-418, 1961 (no. 5). Zie ook Nucleonics **18**, 69-71, dec. 1960.

[2]) F. M. Penning en J. H. A. Moubis, Eine Neutronenröhre ohne Pumpvorrichtung, Physica **4**, 1190, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

We willen thans enige van de vele kernreacties bespreken waarbij neutronen vrijkomen, en wel in de eerste plaats de reactie van beryllium met α-deeltjes: $^{9}Be(\alpha,n)^{12}C$, of, uitvoeriger geschreven:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n + 5{,}65\ MeV. \quad . \quad (1)$$

Verder de reactie van deuterium met deuterium: $D(d,n)^{3}He$, kortweg de D-D-reactie genoemd; uitvoeriger geschreven:

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n + 3{,}26\ MeV. \quad . \quad . \quad (2)$$

Ten slotte de reactie van deuterium met tritium: $T(d,n)^{4}He$, kortweg de D-T-reactie genoemd; uitvoeriger geschreven:

$$^{3}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17{,}6\ MeV. \quad . \quad . \quad (3)$$

Zoals gezegd, vinden deze reacties slechts plaats indien één van de beide deeltjes een grote kinetische energie heeft en op het andere botst. De in de drie reactievergelijkingen vermelde vrijkomende energie verdeelt zich samen met de energie van het opvallende deeltje volgens de behoudswetten van impuls en energie over de beide reactieprodukten. Bij emissie in de voorwaartse richting verkrijgt het neutron de maximale energie, bij emissie in de andere richtingen een overeenkomstig geringere energie. Deze laatste hangt af van de energie van het opvallende deeltje en van de hoek die de baan van het neutron maakt met die van dat deeltje. Een bundel mono-energetische neutronen kan men maken met een collimator die slechts die neutronen doorlaat waarvan de banen binnen een kleine ruimtehoek liggen.

De bovengenoemde kernreactie (1) kan op eenvoudige wijze tot stand gebracht worden. Men behoeft slechts een radioactief preparaat dat α-deeltjes emitteert, b.v. radium of polonium, samen te brengen met beryllium. Op deze wijze werd destijds het neutron ontdekt. De eenvoudigste en oudste neutronenbronnen bestaan dan ook uit een mengsel van b.v. radium- en berylliumpoeder, dat zich in een gesloten buisje bevindt. Ook andere combinaties van α-stralers en neutronenleverende elementen zijn in gebruik.

Dergelijke radioactieve neutronenbronnen zijn weliswaar zeer eenvoudig en hebben kleine afmetingen, een zeer constante neutronenopbrengst en meestal een lange levensduur, maar ze hebben toch enige essentiële nadelen vergeleken bij andere bronnen. Zo is bij voorbeeld het energiespectrum der neutronen complex, hetgeen voor sommige experimenten een complicatie betekent. Sommige radioactieve neutronenbronnen leveren een sterke achtergrond van γ-straling; een radium-berylliumbron b.v. levert ongeveer 10^{4} γ-quanta per neutron. De neutronenflux kan niet gevarieerd worden; men kan de bron dus ook geen neutronenimpulsen laten leveren, wat bij vele experimenten gewenst is. Aangezien men de bron niet kan uitschakelen, vereist hij ook als hij niet in gebruik is, omslachtige afschermingsmaatregelen. Ten slotte: de prijs van zulk een bron neemt voor toenemende neutronenopbrengst zo sterk toe, dat voor een neutronenflux van meer dan 10^{7} neutronen/sec alleen om deze reden al andere soorten neutronenbronnen de voorkeur verdienen.

Om de kernreacties (2) en (3) — en ook de meeste andere reacties van deze categorie — te doen plaatsvinden, kan men niet een in de natuur optredende deeltjesstraling gebruiken; men moet hiertoe één van de beide aan de reactie deelnemende deeltjes kunstmatig een voldoend grote kinetische energie geven. Op dit principe is ook onze neutronenbuis gebaseerd. Sedert de eerste experimenten van Cockcroft en Walton in het jaar 1932 over de opwekking van kernreacties met kunstmatig versnelde deeltjes is deze methode in hoge mate technisch geperfectioneerd. Daar onze neutronenbuis met deeltjesversnellers vele trekken gemeen heeft, maar

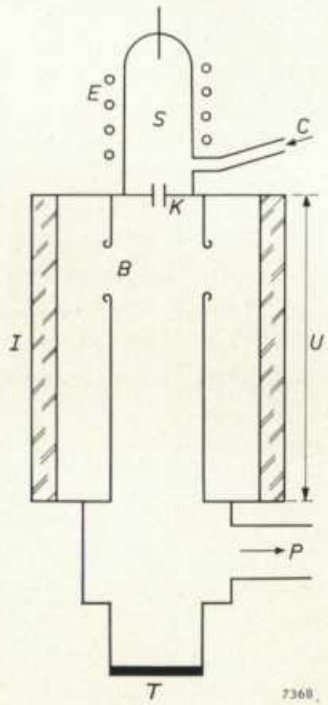


Fig. 1. Principe van een eenvoudige deeltjesversneller. In de ontladingsruimte S van een ionenbron worden gasatomen geioniseerd (getekend is een zg. hoogfrequentie-ionenbron; E is de spoel daarvan). De ionen gaan door het kanaal K naar de geëvacueerde versnellingsruimte B, waarin ze een groot potentiaalverschil U doorlopen, zodat ze, wanneer ze op de trefplaat T vallen, een grote kinetische energie hebben. I hoogspanningsisolator. Bij P wordt het gehele systeem voortdurend geëvacueerd, bij C wordt continu een weinig gas in de ionenbron toegelaten. Door geschikte ionen en een geschikt materiaal voor T te kiezen, kan men kernreacties doen plaatsvinden die neutronen leveren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

er anderzijds ook op essentiële punten van verschilt, willen wij kort de bouw van zo'n versnellingsinstallatie bespreken (*fig. 1*). In een ionenbron *S*, waarin zich een gas bevindt, worden uit dit gas ionen geproduceerd. Een deel van deze ionen bewegen zich door een nauw kanaal *K* naar de geëvacueerde versnellingsbuis *B*, doorlopen het grote potentiaalverschil *U* — hierbij krijgen ze dus een grote kinetische energie — en vallen ten slotte op een (hier geaarde) trefplaat *T* van geschikt materiaal, waarin ze een neutronenleverende kernreactie teweegbrengen. Bij de installatie behoren, behalve de hoogspanningsgenerator, nog verschillende gecompliceerde hulpinstallaties, die terwille van de eenvoud in fig. 1 niet getekend zijn: een hoogfrequentiegenerator voor de ionenbron met de bijbehorende voedingsapparatuur, een volledig vacuümsysteem met voorvacuüm- en hoogvacuümpomp en met koelers, en ten slotte een apparatuur met behulp waarvan, via een regelbaar doseerventiel, gas kan worden toegevoerd aan de ionenbron. Zulke neutronenbronnen met versnellingsbuis hebben weliswaar niet de nadelen van de radioactieve bronnen, maar zijn in het algemeen omvangrijke en kostbare installaties, die dikwijls een afzonderlijk gebouw vereisen [3]) (zie ook de foto op blz. 357 van dit nummer).

In de laatste jaren zijn verschillende pogingen ondernomen om voor neutronenbronnen van dit type constructies te vinden die leiden tot compacte en eventueel verplaatsbare apparaten. Dit is vooral mogelijk geworden door gebruik te maken van de bovenstaande reactie (3). Het waterstofisotoop tritium kan namelijk tegenwoordig, uitgaande van lithium, volgens de reactie $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ in een kernreactor worden geproduceerd en is daardoor in voldoend grote hoeveelheden verkrijgbaar. Gebleken is dat de D-T-reactie, als men de deuteriumionen (deuteronen) versnelt en het tritium als „trefplaat" gebruikt, reeds bij kleine versnellingsspanningen (b.v. 60 kV) een tamelijk grote neutronenopbrengst geeft; de werkzame doorsnede voor de reactie vertoont een maximum bij de ongewoon kleine energie van 107 keV. Door hiervan gebruik te maken, heeft men neutronengeneratoren kunnen construeren die weliswaar nog tamelijk gecompliceerd zijn en die een volledig vacuümsysteem bevatten, maar die toch op één of meer wagentjes gemonteerd kunnen worden en dus mobiel zijn.

We mogen ons overzicht van neutronenbronnen en neutronengeneratoren niet besluiten zonder vermeld te hebben dat tegenwoordig de sterkste neutronenbronnen gevormd worden door de kernreactoren [4]). Deze berusten op een kernreactie van een andere categorie dan hierboven werd beschouwd, nl. waarbij bepaalde atoomkernen (^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu) door neutronen getroffen worden en hierdoor splijten: hierbij komen weer neutronen vrij, en men kan een kettingreactie van neutronenleverende kernsplijtingen krijgen. Dit proces blijft ook lopen wanneer men een relatief gering gedeelte van de neutronen door een kanaal uit de kernreactor naar buiten laat ontsnappen om ze daar te gebruiken. Voor vele toepassingen waarvoor een hoge neutronenflux vereist wordt, kan men de kernreactor nauwelijks door een andere neutronenbron vervangen. Anderzijds zijn kernreactoren echter zo omvangrijk, gecompliceerd en kostbaar dat er slechts weinige van gebouwd kunnen worden, zodat hun toepassingsmogelijkheid beperkt is en een mobiele neutronengenerator op deze grondslag niet zomaar in aanmerking komt.

Een derde categorie van neutronenleverende kernreacties, die we hier volledigheidshalve willen vermelden, treedt op als atoomkernen worden blootgesteld aan energierijke γ-straling (kern-foto-effect). De hierop berustende neutronenbronnen gebruiken als γ-stralingsbron òf een radioactief preparaat en bezitten dan soortgelijke bezwaren als de eerder besproken radioactieve neutronenbronnen, òf ze maken gebruik van grote versnellingsmachines, die weer gecompliceerd en kostbaar zijn.

Ter zijde stippen we ten slotte de mogelijkheid aan, de thermische energie van gassen en plasma's van extreem hoge temperatuur te gebruiken voor het inleiden van kernfusie. Aan de realisering hiervan wordt tegenwoordig in vele laboratoria gewerkt. Mocht men slagen in het construeren van een „fusiereactor", dan zou daarmee een bijzonder sterke bron van snelle neutronen verkregen zijn.

Een bijzonder grote stap in de richting van een compacte, eenvoudige bron van mono-energetische neutronen is gedaan toen het gelukte een neutronengenerator met versneller te construeren in de vorm van een afgesmolten buis, d.w.z. zonder vacuümsysteem en zonder continue gastoevoer naar de ionenbron. De sinds 1955 volgens dit principe ontwikkelde Philips neutronenbuis vindt men afgebeeld in *fig. 2*, de constructie ervan is geschetst in *fig. 3* [5]). In hoofdlijnen is de constructie gelijk aan die van röntgenbuizen, zodat gebruik gemaakt kon worden van de met deze buizen opgedane ervaringen, in het bijzonder wat betreft de hoogspanningsisolatie en de doorslagvastheid. In principe is de neutronenbuis echter toch voortgekomen uit de conventionele neutronengenerator met versneller (fig. 1). Derhalve vinden we hier de essentiële onderdelen van een deeltjesversneller terug: een ionenbron, voor hoogspanning geïsoleerde elektrodes ter versnelling van de ionen, en een trefplaat, die beschoten wordt en daarbij volgens de reactie (3) neutronen

[3]) Zie b.v. A. C. van Dorsten en J. H. Spaa, A high output D-D-neutron generator for biological research, Nucl. Instruments **1**, 259, 1957; zie ook Philips techn. T. **17**, 159-161, 1955.

[4]) Voor het gebruik van een kernreactor als neutronenbron, zie b.v. J. A. Goedkoop, Neutronendiffractie, Philips techn. T. **23**, 33-46, 1961 (no. 2).

[5]) Sindsdien zijn ook door anderen dergelijke neutronengeneratoren geconstrueerd: J. D. Gow en H. C. Pollock, Rev. sci. Instr. **31**, 235-240, 1960 (no. 3). P. O. Hawkins en R. W. Sutton, Rev. sci. Instr. **31**, 241-248, 1960, (no. 3). A. H. Frentrop en H. Sherman, Nucleonics **18**, 72-74, dec. 1960. B. J. Carr, Nucleonics **18**, 75-76, dec. 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

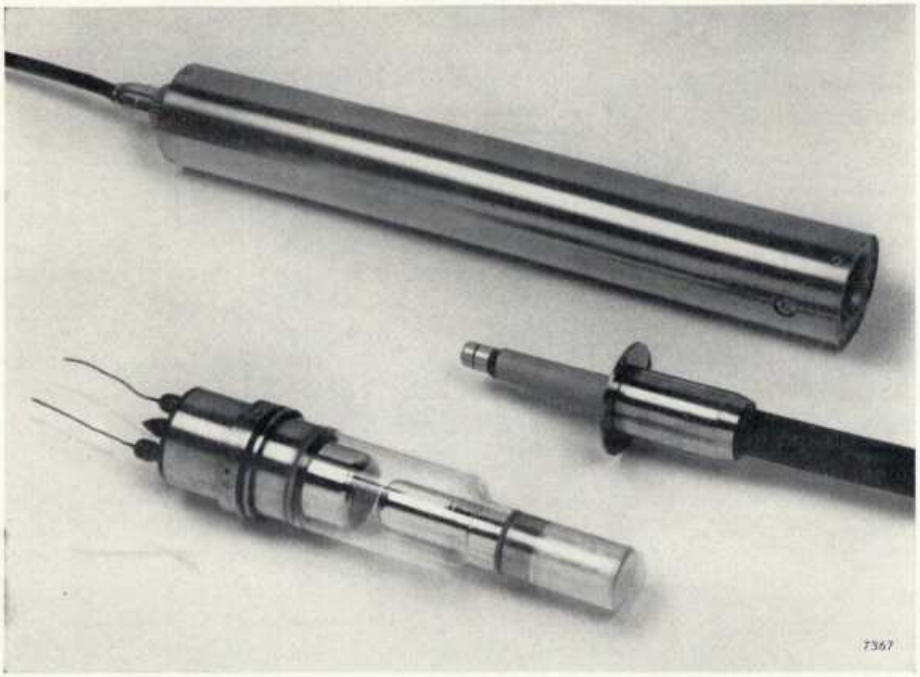


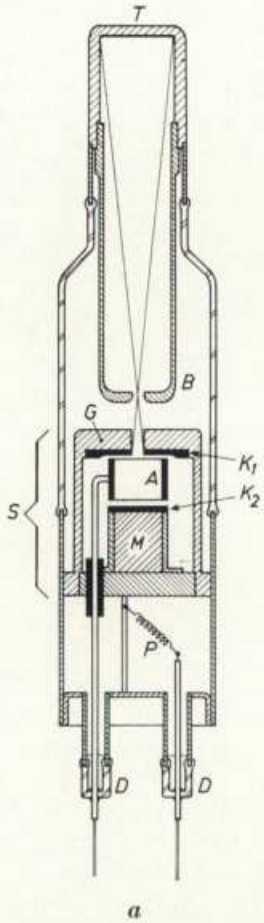
Fig. 2. De Philips neutronenbuis (onder). Het linkerdeel bevindt zich op aardpotentiaal, het bevat de ionenbron en een regelinrichting voor de waterstofdruk. Op het rechterdeel wordt de hoogspanningsbron aangesloten door middel van de kabel met steker (midden). Alvorens de fabriek te verlaten, wordt de buis gemonteerd in het geaarde metalen omhulsel dat men boven ziet en dat een diameter heeft van 7 cm. Dit omhulsel beschermt de buis tegen beschadiging en fungeert tevens als hoogspanningsisolatie; de neutronen worden ongehinderd doorgelaten. De neutronen verlaten de trefplaat in alle richtingen; in de regel gebruikt men echter die welke de buis ongeveer loodrecht op de as verlaten.

emitteren kan. De opbrengst bedraagt meer dan 10^8 neutronen per seconde. Een verschil van ondergeschikte betekenis ten opzichte van de conventionele neutronengenerator is, dat de trefplaat zich hier op hoogspanning bevindt en de ionenbron op aardpotentiaal. Dit biedt praktische voordelen voor de voeding van de ionenbron.

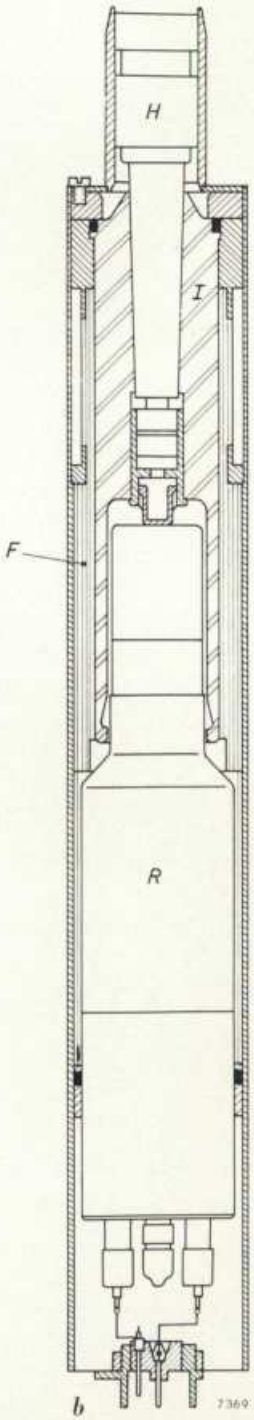
In het volgende hoofdstuk bespreken we de hoofdproblemen die zich bij de constructie van de neutronenbuis hebben voorgedaan en de voor deze problemen gevonden oplossingen.

De neutronenbuis; fundamentele problemen en hun oplossing

Voor de wijze waarop een neutronengenerator volgens fig. 1 werkt, is karakteristiek dat de te ver-



a



b

Fig. 3. *a*) Constructie van de Philips neutronenbuis. *S* ionenbron volgens Penning, tevens fungerend als geaarde versnellingselektrode. *B* hoogspanningselektrode voor een versnellingsspanning van 125 kV. *D* geïsoleerde doorleidingen voor de voedingsspanning van de ionenbron (2-3 kV) en van de regelaar voor de waterstofdruk *P* (0-2 V). *G* weekijzeren busje. *M* permanente magneet. K_1 en K_2 platen die als katode fungeren, en *A* anodecilinder van het elektrodensysteem volgens Penning. *T* trefplaat. De ionenbundel is globaal aangegeven; zijn vorm wordt bepaald door de optische eigenschappen van de elektrische lens, die gevormd wordt door *G* en *B*.
b) Doorsnede door de neutronenbuis, gemonteerd in het omhulsel. *R* de buis. *I* isolator van „Araldit". *F* isolatie-foelie, gedrenkt in isolerende olie. *H* steker van de hoogspanningskabel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

snellen ionen worden gevormd in een ruimte met relatief hoge gasdruk (orde van grootte 10^{-2} torr) en dat ze worden versneld in een ruimte met relatief lage gasdruk (orde van grootte 10^{-5} torr). Dit drukverschil wordt in stand gehouden door aan de ionenbron continu gas toe te voeren (bij *C*) en door aan de versnellingsruimte continu te pompen met een hoogvacuümpomp. Bij een afgesmolten neutronenbuis vervalt deze continue gasdoorstroming en vervalt dus ook het drukverschil tussen ionenbron en versnellingsruimte.

Het eerste probleem bij de constructie van een afgesmolten neutronenbuis luidt derhalve: men moet een ionenbron en een versnellingstrap construeren die bij dezelfde gasdruk kunnen werken. Kiest men een middelmatig hoge druk, dan is daarvan de consequentie dat in de ionenbron bij een relatief lage druk een gasontlading onderhouden moet kunnen worden met een liefst niet al te hoge brandspanning; voor de versnellingstrap betekent het dat tussen de versnellingselektrodes bij een relatief hoge druk en zo hoog mogelijke spanning toch nog geen ontlading of elektrische doorslag mag optreden.

Een tweede probleem dat samenhangt met het ontbreken van de gasdoorstroming in de buis, wordt veroorzaakt door het verlies („clean-up") van gas in de ontlading. In een afgesmolten buis neemt door dit effect de druk zeer snel af. Er moet dus een inrichting ontwikkeld worden die ervoor zorgt dat de druk die in de buis heerst wanneer deze in werking is, gedurende de gehele levensduur van de buis de juiste waarde heeft.

Een derde probleem dat samenhangt met het afgesmolten zijn van de buis, is de levensduur van de trefplaat. De tot nu toe bekende tritiumtrefplaten (voor een met de D-T-reactie werkende buis) hebben een kortere levensduur dan men in het algemeen voor afgesmolten buizen wenst. Verwisseling van trefplaten, zoals bij een op een pomp aangesloten neutronengenerator, is bij een afgesmolten buis natuurlijk niet mogelijk.

De ionenbron

Het eerste van de zojuist genoemde problemen, nl. de eis dat de ionenbron bij lage druk moet werken, kan opgelost worden met behulp van de reeds sedert 25 jaar bekende ionenbron volgens Penning. Het feit dat deze bron bij betrekkelijk lage druk werkt, had F. M. Penning indertijd juist op het idee gebracht, hiermee een afgesmolten neutronenbuis te construeren [2]). Evenals bij andere ionenbronnen vindt ook bij de Penning-bron de produktie van ionen plaats in een gasontlading, vooral dus door botsing van elektronen. Hiertoe is het noodzakelijk dat de vrije weglengte van de elektronen kleiner is dan de totale beschikbare baanlengte. Terwijl echter bij andere ionenbronnen deze baanlengte van de orde is van de afmetingen van de ruimte waarin de ontlading plaatsvindt, zodat de vrije weglengte klein en derhalve de druk in het algemeen hoger dan 10^{-2} torr zijn moet, wordt er bij de Penning-ionenbron voor gezorgd dat de elektronenbaan gemiddeld enige honderden malen zo lang is als de afstand tussen de elektrodes. Men bereikt dit door middel van een speciale elektrodenconfiguratie en een magneetveld. De elektronen kunnen dus ook bij grote vrije weglengte vele ionen vormen en de druk mag derhalve lager zijn (10^{-3}-10^{-4} torr).

Een verder voordeel van de ionenbron volgens Penning is zijn grote eenvoud. Er is geen gloeikatode. De ontlading wordt in deze ionenbron onderhouden door elektronen die uit de katode vrijgemaakt zijn door botsing van ionen of door het fotoelektrisch effect. Voor de voeding heeft men daardoor niets anders nodig dan een gelijkspanning van ca. 2 kV.

In *fig. 4* vindt men een schematische doorsnede van de Penning-ionenbron van de neutronenbuis [1]). Tussen twee schijfvormige katodes K_1 en K_2 is een cilindrische anode *A* aangebracht. Tussen de anode en de katodes wordt een gelijkspanning aangelegd van 2 tot 3 kV. Deze spanning doet in het vulgas een gasontlading ontsteken, waarin de elektronen vele malen tussen de beide katodes heen en weer gaan alvorens op de anode te vallen. Door de

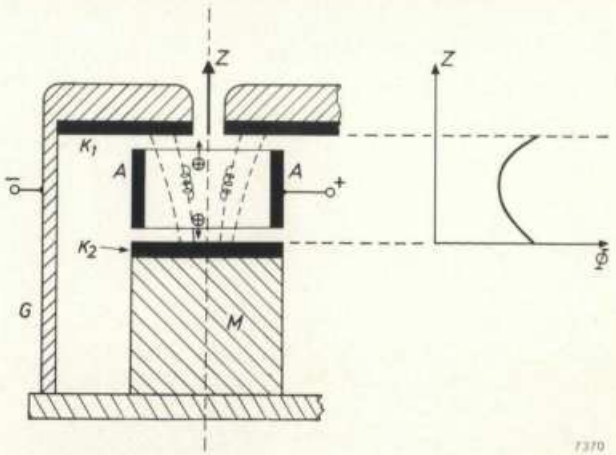


Fig. 4. Schematische doorsnede van de ionenbron van de neutronenbuis. *G* busje. *A* anode en K_1, K_2 katodes van het elektrodensysteem volgens Penning. *M* permanente magneet. De streeplijnen tonen het verloop van de magnetische krachtlijnen; daar *G* van ijzer gemaakt is, is het magnetische circuit gesloten. *Z* richting van de uittredende ionenbundel. De elektronen die de ontlading onderhouden, gaan in de kuil van de potentiaal Φ (zie schets) tussen de katodes heen en weer en beschrijven daarbij, door de invloed van het magneetveld, schroefvormige banen. De weg die de elektronen afleggen, is dientengevolge vele malen langer dan de geometrische afstand van de elektrodes. Daardoor kan de ontlading ook bij betrekkelijk lage gasdruk (b.v. 10^{-3} torr) zelfstandig branden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

invloed van een magneetveld zijn de banen schroefvormig. De ionen, die bij de botsingen van de elektronen met de gasatomen ontstaan, bewegen zich in de richting van de katodes en kunnen de ionenbron verlaten door een gat in de katode K_1. Het magneetveld wordt teweeggebracht door een kleine permanente magneet M, die zich binnen het busje G bevindt waarin het elektrodensysteem is gemonteerd. Dit busje is gemaakt van week ijzer. Het magnetische circuit is daardoor goed gesloten en het magneetveld dringt niet door in de versnellingsruimte, die aan de ionenbron grenst. Dit is van belang in verband met de doorslagvastheid van deze ruimte: in de ionenbron passen we het magneetveld toe ter vergroting van de ionisatiekans en ter verlaging van de brandspanning van de gasontlading, maar in de versnellingsruimte zijn dit uiteraard juist schadelijke effecten.

Een zeker bezwaar van de ionenbron volgens Penning is dat hij, in het door ons gebruikte drukgebied, bij vulling met b.v. waterstof of deuterium, in hoofdzaak één maal geïoniseerde molecuul-ionen H_2^+ resp. D_2^+ levert. Dit is tijdens het in het Philipslaboratorium uitgevoerde onderzoek al in 1956 gebleken bij een analyse van de ionenbundel met behulp van een massaspectrometer (*fig. 5*). Bij gelijke elektrische stroom is het aantal atomen in deze molecuul-ionenbundel tweemaal zo groot als in een bundel atoomionen. Ieder van de beide atomen van een molecuulion krijgt echter slechts de helft van de totale energie, zodat in een neutronenbuis die gevoed wordt met een spanning van 125 kV, slechts 62,5 keV energie voor de kernreactie ter beschikking staat. Daar de kans op het optreden van de reactie in dit energiegebied sterk met de spanning toeneemt, verkrijgt men uiteindelijk een kleinere neutronenopbrengst dan met een straal van atoomionen. Dit nadeel van de ionenbron volgens Penning hebben we geaccepteerd, daar de voordelen van deze ionenbron voor een neutronenbuis — lange levensduur, robuustheid, eenvoudige constructie en eenvoudige bediening — van veel groter belang zijn.

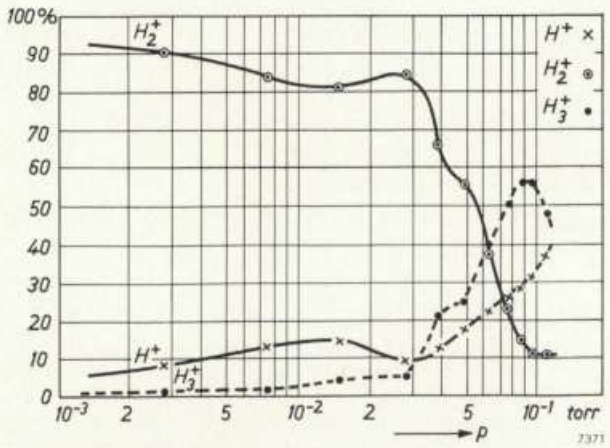


Fig. 5. Samenstelling van de bundel waterstofionen die geleverd wordt door een ionenbron volgens Penning, als functie van de druk. Bij drukken tussen 10^{-3} en 3×10^{-2} torr worden in hoofdzaak molecuulionen H_2^+ gevormd.

De 125-kV-versnellingstrap

In de versnellingsruimte van een conventionele neutronengenerator met hoogvacuümsysteem is de druk kleiner dan 10^{-4} torr; de versnelling geschiedt meestal in een aantal trappen. Bij een voorbereidend onderzoek bleek [1]) dat men bij de constructie van een versnellingssysteem voor 200 kV bij gasdrukken tot 2×10^{-2} torr kan volstaan met één trap. De elektrodenafstand bij dit onderzoek bedroeg ca. 1 cm. Het construeren van een versnellingstrap voor een neutronenbuis die werkt bij een druk van 10^{-3} torr en een versnellingsspanning van 125 kV, moest dus zonder moeite mogelijk zijn. Wel moesten de elektrodes zeer goed gepolijst zijn, om koude emissie van elektronen uit de negatieve elektrode te vermijden. De versnellingselektrodes van de neutronenbuis zijn gemaakt van chroomstaal, dat blijkens de ervaringen met röntgenbuizen slechts een geringe neiging tot koude emissie vertoont.

Zoals uit fig. 3 is af te lezen, gaat de ionenbundel door een gat in het eindvlak van de cilindrische versnellingselektrode B naar het inwendige van deze elektrode; in deze ruimte is geen elektrisch veld. De openingshoek van de ionenbundel wordt bepaald door de optische eigenschappen van de elektrische lens die gevormd wordt door de ionenbron en de versnellingselektrode. In *fig. 6* vindt men een foto van de ionenbundel, die opgenomen is aan een in hoofdzaak van glas vervaardigde proefbuis. De trefplaat is in de definitieve uitvoering van de buis gesitueerd op de plaats waar de ionen de binnenwand van de versnellingselektrode treffen (fig. 3*a*). Het gehele oppervlak van de trefplaat wordt dus door ionen getroffen. Dit maakt het mogelijk de trefplaat zwaar te belasten en een grote neutronenopbrengst te verkrijgen. Zou men de trefplaat op de plaats van de opening van de versnellingselektrode zetten (d.i. op ca. 1 cm afstand), dan zou hij door de, daar zeer nauwe, ionenbundel plaatselijk te sterk worden verhit. De uitvoering van de versnellingselektrode als holle ruimte biedt verder nog het voordeel dat het grootste deel van de uit de trefplaat vrijgemaakte secundaire elektronen „gevangen" worden en niet in de richting van de ionenbron versneld kunnen worden. Deze secundaire elektronen zouden ten eerste ten ge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

volge van hun ioniserende werking de doorslagspanning van de versnellingsruimte verlagen, en ten tweede zouden zij de buitenwand van de ionenbron nodeloos verhitten; door de warmtegeleiding zou dit laatste tot een ongewenste verwarming van andere delen van de buis kunnen leiden. Ten slotte zou ook de röntgenstraling die de secundaire elektronen opwekken, bij vele toepassingen van de neutronenbuis storend kunnen zijn.

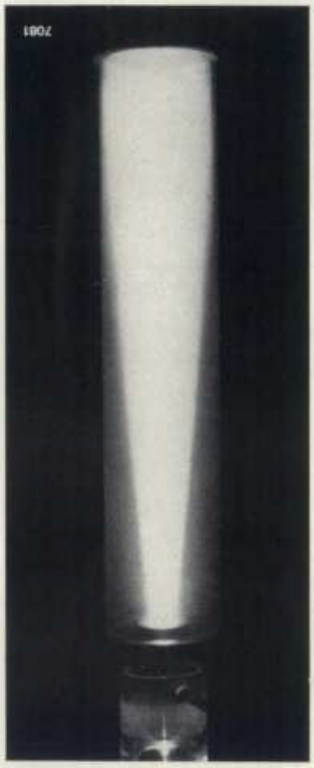


Fig. 6. Foto van de ionenbundel in de neutronenbuis (opgenomen aan een proefbuis die voor dit doel in hoofdzaak van glas vervaardigd was).

De regelaar van de waterstofdruk

Om het tweede probleem, het constant houden en regelen van de gasdruk in de buis op te lossen, moet men een inrichting aanbrengen die vulgas kan naleveren en eventueel ook aan de buis kan onttrekken.

Indien men ermee zou volstaan de buis bij de fabricage tot de juiste druk te vullen en af te smelten, dan zou de druk na het in werking stellen van de buis in het algemeen snel afnemen ten gevolge van het gasverbruik in de ontlading. Het gas wordt in hoofdzaak verbruikt doordat ionen in de elektrodes en in de wanden van de ontladingsruimte geschoten worden.

De toestelletjes die men voor het toelaten van gas in conventionele generatoren met versneller gebruikt — b.v. een palladium- of nikkelbuisje waar waterstofisotopen als het verhit wordt, snel doorheen kunnen diffunderen —, kunnen bij een afgesmolten buis niet toegepast worden. Hiermee kan men namelijk in de praktijk alleen een drukverhoging teweegbrengen, niet echter een spontane toeneming van de druk te niet doen, die b.v. optreedt wanneer eerder in de wand geschoten gas door verwarming van de buis weer vrijkomt.

Een effectief systeem voor regeling van de druk kan men maken door een materiaal te gebruiken dat waterstof exotherm absorbeert. Tot deze materialen horen b.v. de metalen zirkonium en titanium, die onder afgifte van warmte een grote hoeveelheid waterstof (of een waterstofisotoop) kunnen absorberen en bij verwarming weer afgeven. Men moet er slechts voor zorgen dat het oppervlak van het metaal het gas ongehinderd laat passeren, d.w.z. dit oppervlak moet fysisch en chemisch schoon zijn.

Bevindt een dergelijk metaal-waterstofsysteem zich in een geëvacueerde ruimte, dan stelt zich, wat de waterstof betreft, een evenwichtsdruk p in, die van de absolute temperatuur T afhangt volgens de vergelijking:

$$\ln p = -\frac{\Delta H}{RT} + C.$$

In deze vergelijking — de vergelijking van Clausius-Clapeyron — is R de gasconstante, ΔH de reactiewarmte en C een integratieconstante. De evenwichtsdruk neemt, zoals men ziet, toe als de temperatuur stijgt. Een metaal-waterstof-systeem, waarvan men de temperatuur kan variëren, vormt in principe een inrichting voor het regelen van de waterstofdruk. Neemt de zg. atoomverhouding — dat is het aantal waterstofatomen per metaalatoom — toe, doordat b.v. uit andere delen van de buis gas vrijkomt, dan resulteert dit in het algemeen in een drukverhoging, die men kan compenseren door de temperatuur van het metaal-waterstofsysteem te verlagen. Het is een gelukkige omstandigheid dat binnen zekere grenzen de evenwichtsdruk onafhankelijk is van de atoomverhouding. Dit feit — dat men kan verklaren uit een faze-overgang — kan met vrucht gebruikt worden voor het constant houden van de druk in de buis.

In zijn eenvoudigste vorm bestaat de drukregelaar uit een in de neutronenbuis aangebrachte zirkoniumdraad (vgl. fig. 3), die terwille van de mechanische stevigheid om een wolfraamdraad gewikkeld is [6]). Hij kan door een elektrische stroom gemakkelijk en goed reproduceerbaar verwarmd worden.

[6]) K. Nienhuis, Hydrogen-filled electric discharge devices, U. S. octrooi 2 766 397. Deze drukregelaar is het eerst toegepast in waterstofthyratrons. De levensduur van deze buizen is daardoor verlengd tot enige duizenden uren. Zie ook Philips techn. T. **20**, 13, 1958 (fig. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Deze draad wordt vóór het afsmelten van de buis „geladen" met het vulgas. De gewenste gasdruk kan bij het gebruik van de buis ingesteld worden met de gloeistroom; zie *fig. 7*.

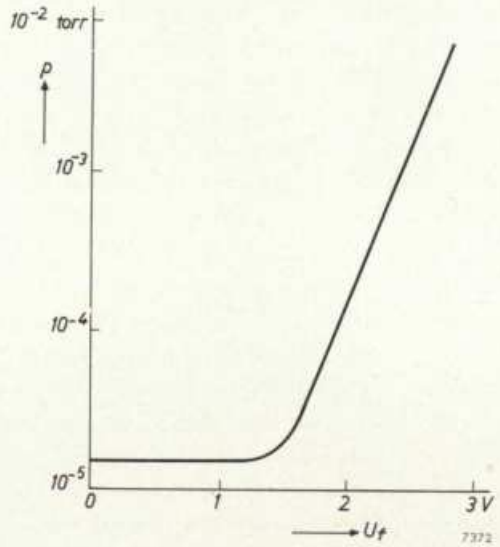


Fig. 7. De druk p in de neutronenbuis als functie van de gloeispanning U_f van de regelaar voor de waterstofdruk.

Een nadeel is dat bij deze uitvoeringsvorm de waterstofisotopen vrij traag worden opgenomen, vooral bij lage gasdruk. De oorzaak ervan is gelegen in de onvermijdelijke verontreiniging van het betrekkelijk kleine zirkoniumoppervlak. Om een sneller reagerend systeem te verkrijgen, moet men de oppervlakte van het absorberende materiaal vergroten. Wij hebben dit gedaan door het waterstof-absorberende metaal te gebruiken in de vorm van een uiterst fijn poeder. Dit is door opdampen aangebracht op een drager die van een ander metaal gemaakt is [7]). Verder is het zirkonium vervangen door titanium. De in onze neutronenbuis aangebrachte drukregelaar bestaat uit een cilinder van dunne nikkelplaat, waarin een gloeidraad is aangebracht, die met een titaniumdraad omwikkeld is. Dit titanium wordt niet verdampt in vacuüm, maar in argon onder een druk van ongeveer 10 torr. Het slaat daarbij als fijn „roet" neer op de binnenkant van de cilinder. De bolvormige roetdeeltjes hebben een diameter van ongeveer 100 Å en zijn kleiner dan met enigerlei mechanische methode bereikbaar is. Dit fijne titaniumpoeder absorbeert snel een grote hoeveelheid waterstof en waterstofisotopen [8]), en geeft deze bij verwarming ook snel weer af. De gloeidraad krijgt bij het gebruik van de buis een nieuwe functie: hij fungeert als verhitter voor het verwarmen van de drukregelaar. Om b.v. een deuteriumdruk van 10^{-3} torr in te stellen, moet het deuteriumhoudende titanium op een temperatuur van ongeveer 260 °C gehouden worden.

De trefplaat

Het laatste belangrijke onderdeel van de neutronenbuis is de trefplaat: de kwaliteit daarvan bepaalt de prestaties en de levensduur van de buis. In onze neutronenbuis wordt, zoals vermeld, de reactie (3) gebruikt. Deze reactie levert snelle neutronen, die bij de door ons gebruikte primaire energie en bij een hoek van 90° tussen de ionenbundel en de neutronenbundel — deze hoek wordt voornamelijk gebruikt — een energie van ca. 14 MeV hebben. Om de reactie tot stand te brengen, worden deuteronen op een tritiumtrefplaat geschoten. Daar tritium gasvormig is, moet het op een of andere wijze ingesloten worden of gebonden aan een vast lichaam. De in de handel zijnde tritiumtrefplaten voor conventionele neutronengeneratoren bestaan b.v. uit een 0,2 mm dik metalen schijfje, waarop een laagje zirkonium of titanium gedampt is ter dikte van ca. 1 μ. Laatstgenoemd laagje is verzadigd met tritium. Onze proeven toonden aan dat de trefplaten met een laagje titanium een grotere opbrengst aan neutronen geven dan de trefplaten met een laagje zirkonium en ook beter tegen hoge temperaturen bestand zijn. Zij konden nog bij 200 °C van vreemde gassen worden gezuiverd en op een onderlaag gesoldeerd zonder tritium te verliezen. Voor toepassing in een afgesmolten neutronenbuis bezitten deze in de handel verkrijgbare trefplaten echter twee nadelen: in de eerste plaats kan men de buis niet ontgassen bij een temperatuur hoger dan 200 °C, en in de tweede plaats bedraagt de levensduur van deze trefplaten, blijkens ervaringen met conventionele neutronengeneratoren, slechts enige honderden uren. Ten einde de neutronenbuis een langere levensduur te kunnen geven, is naar een andere oplossing gezocht [1]).

De oplossing werd gevonden in de zogenaamde regenererende trefplaat, waarvan in de literatuur verscheidene beschreven zijn [9]). Beschiet men b.v. een plaatje goud met deuteronen van enige honderden keV, dan dringen deze het metaal binnen en

[7]) O. Reifenschweiler, Ein Druckregler für Wasserstoffisotope mit großer Einstellgeschwindigkeit des Gleichgewichtsdrucks, Phys. Verh. (Mosbach) jaarg. 1961, 181, (no. 9).

[8]) Het radioactieve gasvormige waterstofisotoop tritium kan voor vele toepassingen gemakkelijker gehanteerd worden wanneer het op deze wijze geabsorbeerd is en men van het titaniumpoeder een suspensie maakt. Zie: O. Reifenschweiler, A suitable tritium carrier for gas discharge tubes, Proc. 2nd United Nations Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy vol. 31, 360-362, sept. 1958, Genève.

[9]) Regenererende trefplaten voor de D-D-reactie zijn het eerst uitvoerig onderzocht door K. Fiebiger: Die Bildung von „Selbsttargets" für die Kernreaktion D(d, n)^{3}He und ihr Zusammenhang mit dem Problem der Wasserstoffdiffusion in Metallen, Z. angew. Physik **9**, 213, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verdelen zich daarin door diffusie. Op den duur ontstaat er zo een deuteriumtrefplaat, waaruit de later opvallende deuteronen volgens de D-D-reactie neutronen kunnen vrijmaken. Men ziet bij een dergelijk experiment dat er zeer spoedig al neutronen geëmitteerd worden en dat de neutronenopbrengst met de tijd toeneemt. Na enige tijd wordt in het algemeen een stationaire waarde bereikt. Een zekere fractie van de in het metaal geschoten deuteronen diffundeert nl. naar het oppervlak en verlaat het metaal weer. De toestand wordt stationair wanneer juist zoveel deuteronen per tijdseenheid uit de trefplaat diffunderen als er opvallen. (De fractie deuteronen die door kernreacties „verbruikt" wordt, is zo klein dat ze nagenoeg geen rol speelt.) Volgens experimenten van Fiebiger [9]) heeft goud de hoogste stationaire concentratie aan deuteronen en levert het de grootste opbrengst aan neutronen.

Tot nog toe hebben we alleen gesproken over een regenererende trefplaat voor de D-D-reactie. Een dergelijke trefplaat voor de D-T-reactie verkrijgen we als we de neutronenbuis vullen met een mengsel van tritium en deuterium en de trefplaat daarmee beschieten. Er komt dan ook tritium in de trefplaat, en met de opvallende deuteronen kan de D-T-reactie plaatsvinden. Uiteraard worden hierbij ook deuterium- en tritiumionen op deuteriumatomen geschoten, en tritiumionen op tritiumatomen. De neutronenopbrengst is hierdoor slechts ongeveer $^1/_3$ van de opbrengst die men krijgt als zuiver tritium wordt beschoten met deuteronen. Metingen en schattingen tonen aan dat van de genoemde concurrerende reacties de reacties D-T en T-D — die beide natuurlijk neutronen van dezelfde energie leveren — het meest tot de neutronenopbrengst bijdragen.

Men kan een en ander op de volgende wijze plausibel maken. We beginnen met te onderstellen dat in een buis die gevuld is met gelijke hoeveelheden deuterium en tritium, ook in de ionenbundel en in de trefplaat deze isotopen in de verhouding 1 : 1 voorkomen. De kans voor het botsen van D met T, T met D, D met D en T met T bedraagt dan voor ieder van deze combinaties een kwart van de waarschijnlijkheid die onder gelijke omstandigheden (dezelfde bundelstroom, dezelfde hoeveelheid gas in de trefplaat) zou gelden in een buis met zuiver tritium in de trefplaat en uitsluitend deuteronen in de bundel. Stellen we de neutronenopbrengst van een dergelijke buis, die ca. 5×10^8 neutronen per seconde kan bedragen, op 100 %, dan is de opbrengst aan 14-MeV-neutronen van de reactie D-T in een buis die gevuld is met het bovengenoemde mengsel, 25%.

De bijdrage van de reactie T-D tot de neutronenopbrengst kan men afleiden uit de overweging dat tritonen die door een zekere spanning versneld zijn, *ten opzichte van het zwaartepunt* van de beide reactiepartners ten gevolge van hun $^3/_2 \times$ zo grote massa een kinetische energie bezitten die slechts $^2/_3$ is van die van deuteronen die door dezelfde spanning versneld zijn. Daar de kinetische energie van de partners ten opzichte van hun gemeenschappelijk zwaartepunt de waarschijnlijkheid van de reactie bepaalt, zijn 60-keV-tritonen dus slechts equivalent met 40-keV-deuteronen. De werkzame doorsnede van de D-T-reacties is bij 40 kV ca. 25 % van die bij 60 kV. Als resultaat vinden we dus een opbrengst aan 14-MeV-neutronen van 6 %.

De bijdrage van de D-D-reactie kan men afleiden uit de neutronenopbrengst van een buis die met zuiver deuterium gevuld is. Zulk een buis levert, blijkens metingen, onder gelijke omstandigheden 5×10^5 neutronen/s. In de buis die met een mengsel gevuld is, is de kans op een D-D-reactie $4\times$ zo klein: deze reactie levert dus in zo'n buis $1{,}25 \times 10^5$ neutronen (van 2,5 MeV) per seconde. Deze opbrengst bedraagt minder dan 0,1 % van de boven genoemde opbrengst van een buis waarin zuiver deuterium op zuiver tritium wordt geschoten.

Bij het botsen van een tritiumion op tritium ten slotte is de waarschijnlijkheid voor het optreden van een kernreactie bij de onderhavige versnellingsspanning zo klein dat de neutronenopbrengst verwaarloosbaar is.

Tellen we alle aldus berekende bijdragen op, dan komen wij op ongeveer 31 %. Onze met een deuterium-tritiummengsel gevulde neutronenbuis levert dus ongeveer $^1/_3$ van het aantal neutronen dat men krijgt uit een buis waarin zuiver tritium wordt beschoten met deuteronen. Van dit derde deel komt $^4/_5$ voor rekening van de D-T-reactie (14-MeV-neutronen) en $^1/_5$ voor rekening van de T-D-reactie (eveneens 14-MeV-neutronen) De fractie 2,5-MeV-neutronen van de D-D-reactie is kleiner dan $1^0/_{00}$.

In de bovenstaande beschouwing is met één omstandigheid nog geen rekening gehouden. Dit is het feit dat in de neutronenbuis geen atoomionen versneld worden, maar in hoofdzaak molecuulionen. Bij de absorptie en desorptie aan de automatische drukregelaar voor de waterstof zullen behalve moleculen D_2 en T_2 ook moleculen DT kunnen ontstaan. Men heeft dus met drie soorten moleculen te doen, waarvan de concentraties zich in het ideale geval verhouden als 1 : 2 : 1. Men mag aannemen dat een nauwkeurige beschouwing die met alle omstandigheden rekening houdt, een resultaat levert dat van het bovenstaande niet aanzienlijk afwijkt.

Doordat in de neutronenbuis een regenererende trefplaat is toegepast, wordt de levensduur ervan niet bepaald door die van de trefplaat. Een bijkomend voordeel is dat de temperatuur waarbij de buis ontgast en geëvacueerd kan worden, niet bepaald wordt door de hittevastheid van de trefplaat, omdat deze pas na het afsmelten van de buis gevuld wordt door beschieting met ionen. Daar echter de bekende regenererende trefplaten, zoals hierboven duidelijk is gemaakt, een kleinere neutronenopbrengst vertonen dan de in de handel verkrijgbare trefplaten, hebben we geprobeerd ze zoveel mogelijk te verbeteren. We zullen thans uiteenzetten op welke wijze dit gelukt is.

Goud, dat volgens de proeven van Fiebiger het meest geschikt zou zijn als materiaal voor een regenererende trefplaat, is een materiaal dat waterstofisotopen van nature niet absorbeert. Bij gebruik als trefplaat wordt het met geweld, nl. door het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ionenbombardement, tot het opnemen van waterstof gedwongen. De verdeling van de waterstof in het metaal wordt vervolgens bepaald door de diffusie. De diffusiecoëfficiënt van waterstof in goud is klein, maar neemt toe met de temperatuur. Dientengevolge kan een merkbare diffusie van de waterstof in het goud alleen plaatsvinden in de laag van de trefplaat die door de opvallende ionen verwarmd wordt (dat is een laag onder het oppervlak ter dikte van de dracht van de ionen). De maximaal bereikbare concentratie in het gedeelte waar de opvallende ionen kunnen doordringen en waar dus kernreacties kunnen plaatsvinden, wordt bepaald door het wegdiffunderen van de waterstof via het oppervlak: de diffusie naar andere delen van het metaal kan verwaarloosd worden. Deze van Fiebiger afkomstige beschouwing is door diens experimenten aan goud bevestigd [9]). Een en ander is in *fig. 8a* in beeld gebracht.

In tegenstelling met goud hebben de metalen zirkonium en titanium de reeds vermelde eigenschap dat ze waterstofisotopen sterk exotherm absorberen. Hierbij kunnen zelfs de verbindingen ZrH_2 resp. TiH_2 ontstaan. Dit betekent dat, zolang de trefplaat nog niet met waterstof verzadigd is, het naar buiten diffunderen door het oppervlak verhinderd wordt door een potentiaalberg. In titanium of zirkonium zou dus gemakkelijker een hogere concentratie aan waterstof verkregen en gehandhaafd kunnen worden dan in goud, ware het niet dat — in verband met de grote diffusiecoëfficiënten in Zr en Ti — een groot gedeelte van de waterstofatomen naar achteren uit de reactiezone wegdiffundeert, zoals door fig. 8*b* wordt geïllustreerd. Bij de experimenten van Fiebiger, waarbij zirkonium en titanium minder neutronen leverden dan goud, was dit blijkbaar het geval.

Men kan nu dit wegdiffunderen uit de reactiezone verhinderen door het werkzame metaal in de vorm van een dunne laag aan te brengen op een onderlaag waarin waterstof moeilijk diffundeert. Deze dunne laag, waarvan de dikte ongeveer gelijk moet zijn aan de dracht van de ionen, wordt bij beschieting betrekkelijk snel met waterstof gevuld (bij 100 μA in 15 uur); de verzadigingsconcentratie is hoog (fig. 8*c*). Met een dergelijke trefplaat hebben wij onze neutronenbuis uitgerust; hij bestaat uit een laagje titanium ter dikte van ongeveer 1 μ, dat op een zilverplaatje is gedampt. Bij een versnellingsspanning van 125 kV en een ionenstroom van 100 μA worden meer dan 10^8 neutronen per seconde verkregen. Bij de beste exemplaren is een opbrengst gemeten van $2{,}4 \times 10^8$ neutronen/s.

Behalve de grotere neutronenopbrengst — onge-

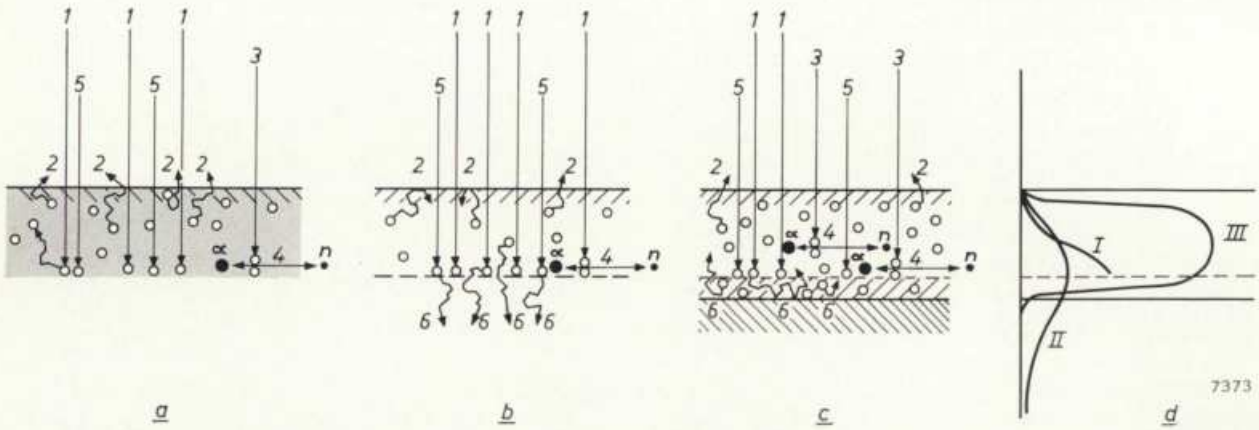


Fig. 8. Schematische voorstelling van verschillende regenererende trefplaten voor de D-D-reactie.
a) Trefplaat van goud, volgens Fiebiger [9]). Goud absorbeert waterstofisotopen van nature niet. De deuteronen worden echter in het metaal geschoten (*1*). Door het samenspel tussen het indringen van de deuteronen, de diffusie in het metaal (alleen bij hoge temperatuur), de verhitting door het deuteronenbombardement en de diffusie naar buiten (*2*) ontstaat op den duur in een dunne laag (grijze tint) een zekere stationaire concentratie van deuteronen. Tussen een deuteron in de trefplaat en een later opvallend deuteron (*3*) kan een kernreactie optreden (*4*), of het aankomende deuteron draagt bij tot het in stand houden van de concentratie in de trefplaat (*5*). Kromme *I* (zie *d*) toont de dichtheidsverdeling die het deuterium in een dergelijke trefplaat van goud in stationaire toestand waarschijnlijk heeft [9]).
b) Trefplaat van massief titanium. De cijfers hebben analoge betekenis als in (*a*). Titanium neemt waterstofisotopen gretig op, tot een verzadigingsconcentratie beantwoordend aan de vorming van TiD_2. De in de trefplaat geschoten deuteronen (*1*) kunnen echter deze verzadigingsconcentratie niet opbouwen, daar in titanium een sterke diffusie plaatsvindt, ook in koude toestand, zodat de meeste deuteronen, ook al speelt diffusie naar buiten (*2*) hier vrijwel geen rol, naar achteren uit de reactiezone verdwijnen (*6*). Kromme *II* (zie *d*) toont de veronderstelde dichtheidsverdeling van de deuteronen. De neutronenopbrengst zal hier klaarblijkelijk geringer zijn dan in geval (*a*).
c) Trefplaat met dunne laag titanium, die in onze neutronenbuis wordt gebruikt [1]). De laag is iets dikker dan de dracht van de opgeschoten deuteronen (*1*) en is aangebracht op een metaal dat een kleine diffusiecoëfficiënt voor waterstofisotopen heeft. Daar de diffusie naar achteren (*6*) bij deze trefplaat onmogelijk gemaakt is, wordt een zeer hoge concentratie van deuteronen bereikt. Kromme *III* in (*d*) toont de naar alle waarschijnlijkheid optredende dichtheidsverdeling van het deuterium. De neutronenopbrengst is 3× zo groot als in geval (*a*).
De figuren *a*, *b*, *c* gelden eveneens voor de D-T-reactie. Sommige cirkeltjes stellen dan D-kernen voor, sommige T-kernen. Bij de D-T-reactie ontstaan, zoals aangegeven, α-deeltjes (bij de D-D-reactie ontstaan ^{3}He-kernen).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

veer een factor 3! — heeft de regenererende trefplaat met titanium vergeleken bij die met goud bovendien nog het voordeel van een betere hittevastheid: bij 200 °C is hij nog stabiel. Volgens Fiebiger neemt de neutronenopbrengst van een trefplaat met goud reeds sterk af indien de temperatuur boven 120 °C komt.

De neutronenbuis in werking

Om de neutronenbuis te doen werken, heeft men een hoogspanningsgenerator nodig voor 125 kV (b.v. een cascadegenerator) die een stroom levert van 100-200 μA. Verder een gelijkspanningsbron die bij 2-3 kV een stroom levert van 0,3-1,0 mA. Ten slotte voor de automatische regelaar van de waterstofdruk een bron van tussen 0 en 2 volt varieerbare wisselspanning die een stroom van ten hoogste 5 ampère kan leveren (*fig. 9*). De stroom in de neutronenbuis meet men met een microampèremeter, die b.v. opgenomen is in de toevoerleiding van de hoogspanning. Deze stroom bestaat echter deels uit elektronen die zich naar de ionenbron bewegen. De ionenstroom zelf kan men calorimetrisch bepalen. Ook kan men de stroom van teruglopende elektronen afzonderlijk bepalen door de röntgenstraling te meten die erdoor opgewekt wordt. Metingen volgens beide methodes hebben geleerd dat ongeveer 80% van de stroom uit ionen bestaat.

De neutronenopbrengst kan met iedere geijkte neutronendetector gemeten worden. Voor een nauwkeurige meting gebruikten wij een activeringsmethode (waarvoor geen ijking nodig is). Men brengt hierbij in de buurt van de trefplaat een schijfje koper; daarin vindt dan de reactie $^{63}Cu(n,2n)^{62}Cu$ plaats. Het gevormde ^{62}Cu emitteert positronen (β^+) en desintegreert met een halveringstijd van ongeveer 10 minuten. Er wordt dus een beperkte hoeveelheid ^{62}Cu gevormd, waarvan de grootte afhangt van het evenwicht tussen produktie en desintegratie. Meet men de β^+-activiteit (met een telbuis met eindvenster), dan kan men, rekening houdend met de geometrie van de opstelling, met behulp van de bekende werkzame doorsnede van de genoemde (n,2n)-reactie de neutronenopbrengst berekenen. Ter vergelijking is de mate waarin het koperplaatje geactiveerd werd, ook bepaald met de zg. methode van de geassocieerde deeltjes. Bij de D-T-reactie (3) wordt immers tegelijk met het neutron een α-deeltje gevormd, dat in de tegengestelde richting wegvliegt. Telt men deze α-deeltjes, b.v. met een telbuis met eindvenster, dan kent men tegelijk het aantal der neutronen die bij dezelfde geometrische configuratie op het tegenover de teller geplaatste koperschijfje gevallen zijn en dit geacti-

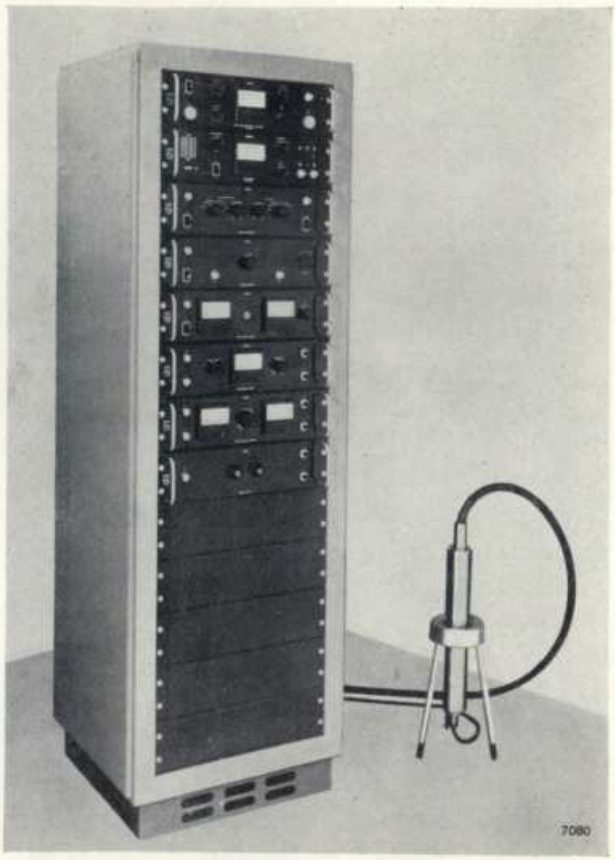


Fig. 9. De Philips neutronenbuis in omhulsel en de bijbehorende voedingsapparatuur. Onder in het rek bevindt zich achteraan de hoogspanningsgenerator; daarvóór is nog ruimte voor vijf panelen, o.a. voor meetdoeleinden. De vier panelen die bij de neutronenbuis horen, zijn direct daarboven gemonteerd. Ze dienen, van beneden naar boven, voor de voeding, voor variatie — aan de primaire zijde van de transformator — en controle van de hoogspanning, voor besturing en controle van de regelaar van de waterstofdruk, en ten slotte voor besturing en controle van de ionenbron. Hierboven bevindt zich in het rek nog een impulsgenerator (twee panelen), die men moet gebruiken als men de neutronenbuis impulsen wil laten leveren, en een teller met impulsdichtheidsmeter voor het meten en controleren van de neutronenflux (eveneens twee panelen).

veerd hebben. Beide methodes — de berekening uit de werkzame doorsnede en de bepaling door middel van de geassocieerde α-deeltjes — leverden overeenstemmende resultaten op.

Experimenteel is bepaald hoe de neutronenopbrengst van een verzadigde regenererende titaniumtrefplaat verloopt met de versnellingsspanning. Verder is voor een aantal gevallen de neutronenopbrengst berekend uit de werkzame doorsnede van de D-T-reactie en uit het atomaire remvermogen („atomic stopping power") van de verbinding TiT_2, titaniumtritide. Dit is geschied voor de ionenbundels met verschillende samenstelling en voor twee verschillende trefplaten met resp. de atoomverhoudingen 1 : 1 (tritium, titanium) en 0,5 : 0,5 : 1 (deuterium, tritium, titanium). De resultaten zijn samengevat in *fig. 10*. Zoals men ziet, liggen de meetpunten zeer dicht bij de corresponderende berekende

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kromme. Bij een versnellingsspanning van 125 kV en een ionenstroom van 100 μA — onder deze omstandigheden werkte de buis zeer stabiel — is de neutronenopbrengst ruim 10^8 neutronen per seconde. Verder toont fig. 10 dat gebruik van een trefplaat met zuiver tritium en een vulling met zuiver deuterium de neutronenopbrengst 3× zo groot zou maken. Zoals reeds is vermeld, zou dit de levensduur van de buis echter beperken tot enkele honderden uren.

De levensduur van een regenererende trefplaat is vrijwel onbeperkt. Tot nu toe werden met diverse buizen uit de normale produktie levensduurproeven gedaan van 1000 uur, en wel met 125 kV versnellingsspanning en 100 of 200 μA ionenstroom, waarbij de neutronenopbrengst resp. meer dan 10^8 en 2×10^8 neutronen/seconde bedroeg. Bij geen van deze buizen viel gedurende of na de proeven een vermindering van betrouwbaarheid of van neutronenopbrengst te bespeuren.

De neutronenopbrengst kan men instellen op iedere waarde tussen 0 en het maximum door variatie van de versnellingsspanning, of, nog beter, door variatie van de gasdruk of van de voedingsspanning van de ionenbron. Men kan de neutronenopbrengst ook stabiliseren, waarvoor het in de meeste gevallen voldoende zal zijn de stroom van de ionenbron automatisch constant te houden door deze terug te laten werken op de voedingsspanning van de regelaar voor de waterstofdruk. De gunstigste gasdruk is gebleken ongeveer 10^{-3} torr te zijn.

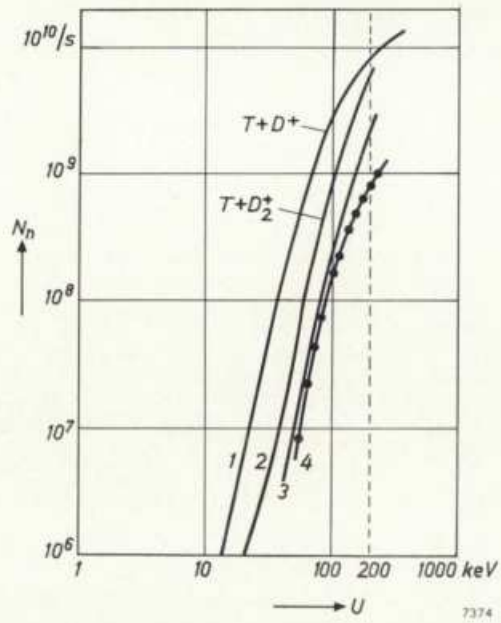


Fig. 10. De neutronenopbrengst N_n (het aantal neutronen per seconde) bij een buisstroom van 100 μA als functie van de versnellingsspanning U. De krommen *1*, *2* en *3* zijn berekend, kromme *4* is gemeten aan de neutronenbuis. Kromme *1*: berekend uit de werkzame doorsnede van de D-T-reactie en het atomaire remvermogen van titanium in een titanium-tritium-trefplaat met atoomverhouding 1:1 (tritium-titanium). Aangenomen is dat in de ionenbundel uitsluitend atoomionen D^+ (deuteronen) voorkomen. Kromme *2*: bestaat de ionenbundel in hoofdzaak uit molecuulionen D_2^+, zoals bij onze neutronenbuis het geval is, dan vindt men een 3× zo kleine neutronenopbrengst. Kromme *3*: berekend voor het geval (overige omstandigheden gelijk) dat het vulgas en dus ook de ionenbundel bestaan uit een mengsel van gelijke hoeveelheden deuterium en tritium en dat de trefplaat een regenererende trefplaat met een laagje titanium is. De bundel bestaat weer uit molecuulionen. Deze omstandigheden gelden voor de uitgevoerde buis. Deze berekende kromme klopt vrij goed met de gemeten waarden, kromme *4*.

Bij vele toepassingen van de neutronenbuis wenst men impulsen in plaats van een continue neutronenstroom. Deze kunnen gemakkelijk verkregen worden door de ionenbron te voeden met een kanteelspanning. De minimale impulsduur is 5 μs. De neutronenopbrengst gedurende een impuls is ongeveer het tienvoudige van die in een continue neutronenstroom; zelfs als de pauze tussen twee impulsen 9× zo lang duurt als de impulsen zelf, verkrijgt men dus nog dezelfde gemiddelde neutronenopbrengst als wanneer de buis continu werkt.

Toepassingsmogelijkheden

We willen tot slot enige typische voorbeelden van toepassing van neutronenbuizen bespreken. Vooraf zij er nog eens op gewezen dat het bijzondere van deze stralingsbron niet daarin bestaat dat men er moeilijk te produceren elementaire deeltjes mee zou kunnen verkrijgen, zoals met de zeer grote versnellers het geval is, maar dat men er een gemakkelijk te bedienen en betrekkelijk goedkope bron van snelle mono-energetische neutronen aan heeft, die tegenover de conventionele neutronengeneratoren vooral het voordeel bezit van de gemakkelijke verplaatsbaarheid.

Het meest voor de hand liggende toepassingsgebied van neutronenbuizen is natuurlijk dat van het zuiver wetenschappelijk kernfysisch onderzoek — vooral wat betreft de neutronenfysica —, en wel in al die gevallen waar een opbrengst van 10^8 neutronen/s voldoende is. Zo worden neutronenbuizen gebruikt bij het onderzoek van elastische en niet-elastische verstrooiingsprocessen van snelle neutronen, voor het bestuderen van vangstprocessen van langzame neutronen, voor de produktie van radioactieve isotopen en het onderzoek naar de eigenschappen daarvan, en voor de ijking van neutronenspectrometers [10]), wilsonvaten, bellenvaten en kernemulsies.

Verder vinden neutronenbuizen een brede toepassing in alle gevallen waarin het neutron als hulpmiddel gebruikt wordt, hetzij ter oplossing van zuiver wetenschappelijke, hetzij ter oplossing van

[10]) L. J. de Vries en F. Udo, A fast pulse-shape discriminator with applications as a spectrometer and sensitive monitor for 1-30 MeV neutrons, Nucl. Instr. Meth. **13**, 153-160, 1961 (no. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

technische problemen. Zo kan men een neutronenbuis met vrucht gebruiken wanneer men een kleine hoeveelheid van een radioactief isotoop met korte halveringstijd wil produceren ter plaatse waar het gebruikt moet worden. Deze toepassingsmogelijkheid is b.v. van belang voor chemisch en biologisch onderzoek en ook voor de oplossing van vele technische problemen. Juist voor de produktie van kortlevende isotopen is de neutronenbuis bijzonder van belang, omdat, als men deze in een kernreactor produceert, het vervoer naar de plaats van gebruik in de regel te lang duurt.

Een ander toepassingsgebied, verwant met het bovenstaande, is dat van het niet-destructieve materiaalonderzoek. Hierbij zijn twee methodes te onderscheiden, te weten de zg. activeringsanalyse en de analyse door middel van direct geïnduceerde γ-straling. Bij de activeringsanalyse (vgl. ook de boven beschreven meetmethode voor de neutronenopbrengst) wordt het te onderzoeken object bestraald met snelle of langzame neutronen, waardoor het radioactief wordt. Door deze radioactiviteit te onderzoeken, kan men verscheidene in het object aanwezige elementen kwantitatief bepalen. Men bepaalt daartoe de aard van de uitgezonden straling en meet de intensiteit daarvan; ook wordt soms de halveringstijd gemeten. Op deze wijze kunnen bijna alle elementen aangetoond en bepaald worden. Eventueel wordt de radioactieve methode gecombineerd met een chemische voor- of nabehandeling.

Bij de tweede methode van niet-destructief materiaalonderzoek meet men met een γ-spectrometer de γ-straling die tijdens een bestraling met neutronen ontstaat, bij sommige elementen door niet-elastische verstrooiing van een snel neutron, bij andere in hoofdzaak door de vangst van een langzaam neutron (n,-γ-reactie). Het gaat hier om een γ-spectraalanalyse die enigszins analoog is met de welbekende röntgenspectraalanalyse.

Deze analysemethodes zijn in 't bijzonder ook geschikt voor geologisch onderzoek; de verplaatsbaarheid van de neutronenbuis maakt het mogelijk een dergelijk onderzoek van gesteenten in situ uit te voeren. Een karakteristiek en technisch belangrijk voorbeeld hiervan is een methode voor het opsporen van minerale olie in de omgeving van een boorgat. Hierbij wordt de neutronenbron, samen met een geschikte detector, in het boorgat neergelaten. Met behulp van de bovenbeschreven methode der activeringsananlyse kunnen in principe alle geologisch belangrijke elementen aangetoond worden. De methode der γ-spectra schijnt, door de efficiënte en eenvoudige detectie, nog betere vooruitzichten te bieden. In het bijzonder is het daarbij mogelijk, voor de analyse ook gebruik te maken van de tijdsverschillen tussen de genoemde stralingscomponenten, die resp. worden opgewekt direct door de 14-MeV-neutronen en door de eerst tot thermische snelheid afgeremde neutronen. De elementen koolstof en zuurstof kunnen daardoor beter worden onderscheiden van waterstof, silicium en chloor, en hierdoor is een gemakkelijke onderscheiding b.v. tussen zout en zoet water of tussen zout water en minerale olie mogelijk. Deze onderscheiding door tijdsverschillen is natuurlijk alleen met een in impulsen werkende bron van snelle neutronen uitvoerbaar [11]).

Een ander belangrijk toepassingsgebied van neutronenbuizen — wederom speciaal van buizen die impulsen leveren — is de reactorfysica. De belangrijkste neutronenfysische eigenschappen van reactormaterialen kunnen gemeten worden in subcritische installaties, waarin men door naar binnen schieten van een neutronenimpuls kortstondig een grote neutronenflux opwekt. Ook onderzoekingen aan afschermingsmaterialen voor neutronen kunnen met een neutronenbuis eenvoudig gedaan worden.

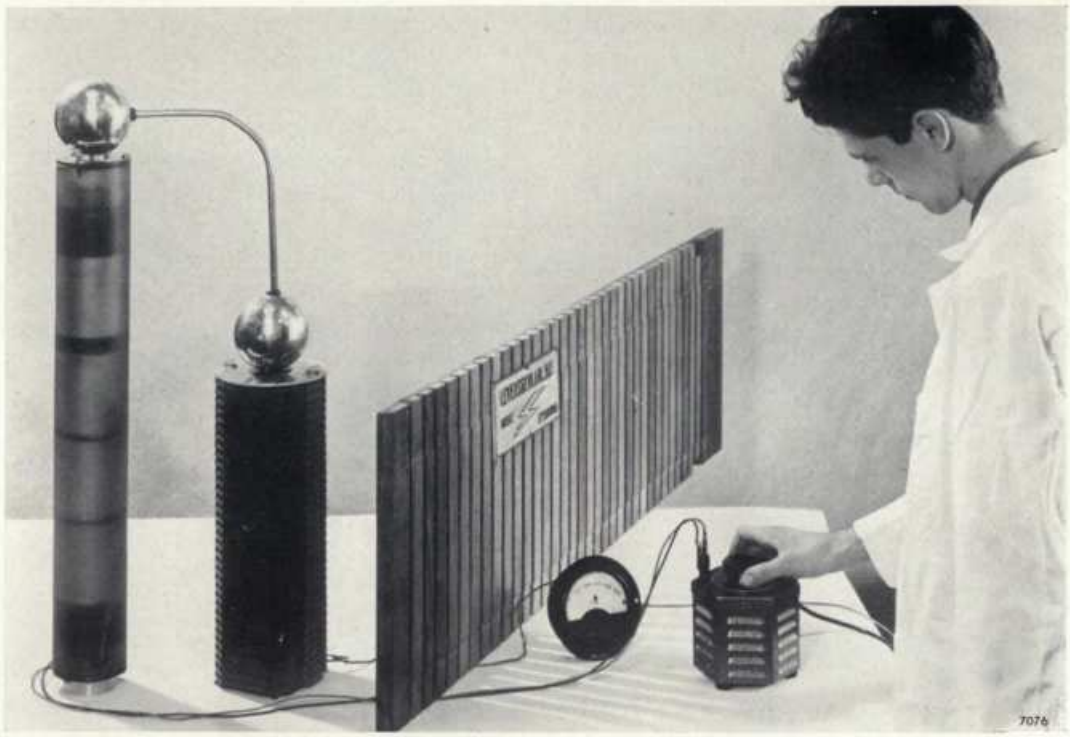
Niet minder belangrijk is de toepassing van de neutronenbuis voor onderwijsdoeleinden. Daar de buis eenvoudig te bedienen is en de intensiteit gemakkelijk tussen 0 en het maximum kan worden ingesteld, is hij een ideaal hulpmiddel bij college- en practicumproeven. Naast de eigenlijke neutronenfysica maakt de buis hier ook het interessante gebied van de kunstmatige radioactiviteit gemakkelijk toegankelijk.

[11]) R. L. Caldwell en W. R. Mills Jr., Nucl. Instr. Meth. **5**, 312, 1959.
J. Tittman en W. B. Nelligan, Amer. Inst. Mining Engrs., Meeting Casper (Wyoming), april 1959, paper 1227 G.
B. G. Erozolimskii, A. S. Shkol'nikov en A. I. Isakov, Atomic Energy (Moskou) **9**, 144, 1960.

Samenvatting. Na een korte beschrijving van de gangbare neutronenbronnen wordt een afgesmolten buis beschreven die in afmetingen en werking enigszins op een röntgenbuis lijkt en die neutronen van 14 MeV kan leveren. Bij een voedingsspanning van 125 kV is de opbrengst groter dan 10^8 neutronen per seconde. De neutronen worden gemaakt door een kernreactie tussen deuterium en tritium, nl. $T(d,n)^4He$. De deuteronen worden geproduceerd in een ionenbron volgens Penning en versneld in één 125-kV-trap. De trefplaat bestaat uit een op zilver gedampt laagje titanium (dikte 1 μ) dat tritium bevat. De buis is gevuld met een D_2-T_2-mengsel (druk $\approx 10^{-3}$ torr), zodat ook T-ionen op de trefplaat vallen en de verzadiging met tritium daarvan aldus nagenoeg onbeperkt doen voortduren; de trefplaat bepaalt niet de levensduur van de buis. De gasdruk wordt ingesteld met een ingebouwde drukregelaar die een grote voorraad deuterium en tritium bevat, zodat het gasverlies („gas clean-up") gecompenseerd kan worden en ook dit de levensduur van de buis niet beperkt. Levensduurproeven aan diverse buizen hebben aangetoond, dat deze meer dan 1000 uur zonder achteruitgang van betrouwbaarheid en neutronenopbrengst kunnen werken. In impulsen (kortste duur 5 μs) kan de buis 10^9 neutronen/s leveren. Tor slot worden enige karakteristieke toepassingsvoorbeelden aangestipt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



EEN EXPERIMENTELE HOOGSPANNINGSGENERATOR VAN ZEER KLEINE AFMETINGEN

door H. P. J. BREKOO *) en A. VERHOEFF **).

621.314.54

Voor het opwekken van hoge gelijkspanningen, die men b.v. in de kernfysica nodig heeft voor deeltjesversnellers of voor de neutronenbuis die in het voorgaande artikel is beschreven, gebruikt men hetzij de Van de Graaff-generator, hetzij de cascadegenerator volgens Greinacher. Bij de laatste wordt door een schakeling van gelijkrichters en condensatoren (*fig. 1a*) de uitgangsspanning van een hoogspanningstransformator gelijkgericht en vermenigvuldigd [1]). De cascadegenerator kan een aanmerkelijk grotere stroom leveren dan de Van de Graaff-generator.

De conventionele bouw van cascadegeneratoren sluit direct bij fig. 1*a* aan: twee zuilen van hoogspanningscondensatoren zijn op geschikte wijze verbonden door gelijkrichters (buizen of halfgeleiderdiodes). De afstand tussen de beide zuilen en die tussen de opvolgende trappen moeten zo groot zijn dat overslag niet kan optreden en dat ook de sproeiverliezen binnen redelijke grenzen blijven. Dientengevolge zijn de afmetingen van een cascadegenerator voor b.v. 150 kV reeds zo groot dat men er meestal een bijzondere ruimte voor moet inrichten. Om de bereikbare spanning te verhogen resp. de afmetingen te verkleinen, monteert men hoogspanningsgeneratoren tegenwoordig dikwijls in een drukvat dat gevuld is met een gas waarin geen sproeiverliezen optreden [2]).

Een bijzonder compacte cascadegenerator kan geconstrueerd worden indien men gebruik maakt van moderne isolatiematerialen, o.a. van giethars. De hierop gebaseerde constructie van de experimentele cascadegenerator voor 100 kV en 200 μA die men vindt afgebeeld in de titelfoto, wordt duidelijk wanneer men de Greinacher-schakeling van fig. 1*a* tekent in de vorm van fig. 1*b*. De onderdelen zijn hier verdeeld over *drie* zuilen [2]). De ruimte is zo effectief mogelijk gebruikt door deze drie zuilen ieder uit te voeren als een holle buis en ze in elkaar te schuiven; zie fig. 1*c* en *fig. 2*.

De condensatoren zijn wikkelcondensatoren die

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.
**) Destijds Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.
[1]) Zie ook A. Kuntke, Philips techn. T. **2**, 161-165, 1937; Tj. Douma en H. P. J. Brekoo, Philips techn. T. **11**, 123-129, 1949 en A. C. van Dorsten, Philips techn. T. **17**, 159-161, 1955.

[2]) Zie ook het derde van de onder [1]) aangehaalde artikelen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

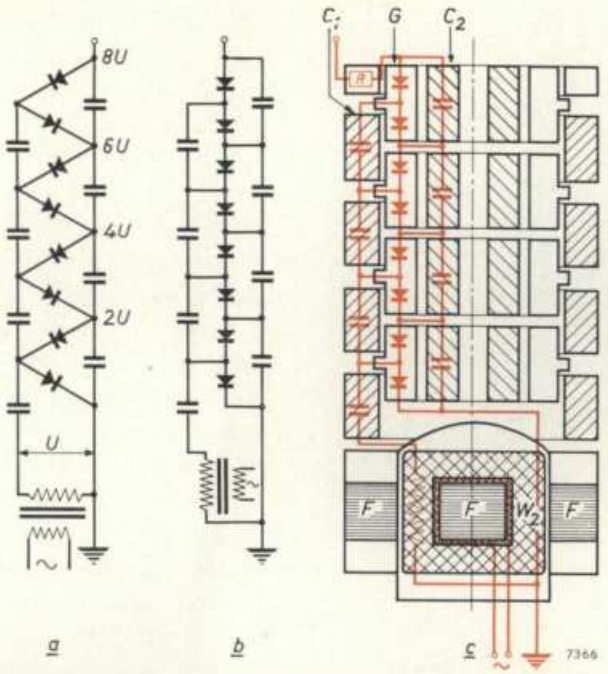


Fig. 1. *a*) Schakeling van een cascadegenerator volgens Greinacher. Door geschikte combinatie van condensatoren en gelijkrichters (buizen of halfgeleiderdiodes) wordt de wisselspanning (topwaarde U) gelijkgericht en vermenigvuldigd; in het getekende geval verkrijgt men een gelijkspanning $8U$.
b) De schakeling volgens Greinacher, getekend op een andere wijze: de onderdelen zijn nu verdeeld over *drie* zuilen.
c) Schematische voorstelling van de miniatuur-cascadegenerator van de titelfoto. Twee buisvormige zuilen van condensatoren (C_1 en C_2) en een gelijkrichterzuil (G) zijn coaxiaal in elkaar geschoven. W_2 hoogspanningswikkeling van de transformator. F ijzerkern. R dempweerstand. Ten einde de onderdelen te kunnen identificeren, is de in fig. 1*b* getekende vorm van de Greinacher-schakeling rood in de figuur gedrukt. De isolatie vindt plaats met behulp van isolatiefoelie en door ingieten in giethars, bovendien wordt de gehele generator opgesloten in een buis die gevuld is met transformatorolie.

gemaakt zijn van aluminiumfoelie en foelie voor hoogspanningsisolatie. Reeds gedurende het wikkelproces worden ze gedrenkt in transformatorolie. De „zuil" van gelijkrichters — men vindt deze in *fig.* 3 nog duidelijker afgebeeld — bestaat uit 2×175 siliciumdiodes OA 202 in serieschakeling, die gerangschikt zijn langs een schroeflijn en ingegoten in giethars. De vorm van de hoogspanningstransformator past bij de cilindrische vorm van de andere onderdelen: zijn ijzerkern heeft een cirkelvormige doorsnee. De wikkeling is eveneens ingegoten in giethars. De hele generator, die uit vier trappen bestaat, is ondergebracht in een met transformatorolie gevulde buis van een kunststof op basis van polyvinylchloride. In de ringvormige ruimte die vrijblijft boven de buitencondensator van de laatste cascadetrap, is een dempweerstand van ongeveer 100 kΩ ondergebracht (R in fig. 1*c*). Deze weerstand is, op analoge wijze als de gelijkrichters (fig. 3), samengesteld uit een aantal kleinere weerstanden, die schroefvormig op een lichaam van giethars gewikkeld zijn. De cascadegenerator zonder geaard omhulsel is 80 cm lang en heeft een buitendiameter van 9,6 cm. Hij is ontworpen voor een netfrequentie van 50 Hz. Uiteraard kunnen volgens hetzelfde principe ook generatoren voor hogere werkfrequenties geconstrueerd worden, die dan door de kleinere capaciteiten nog kleinere afmetingen kunnen hebben.

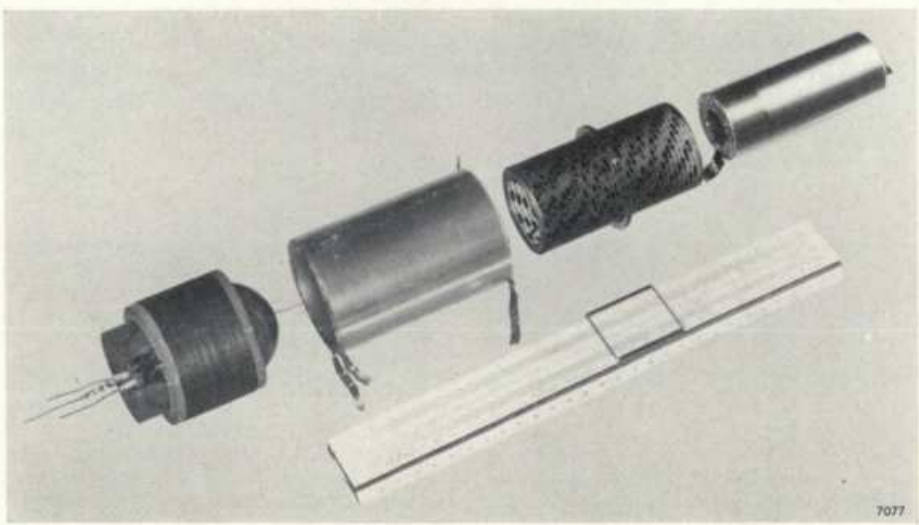


Fig. 2. De eerste trap van de hoogspanningsgenerator vóór de montage. De met giethars geïsoleerde transformator is ontworpen voor 12,5 kV en 50 Hz; de uitgangsspanning van de eerste trap is dan 25 kV.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

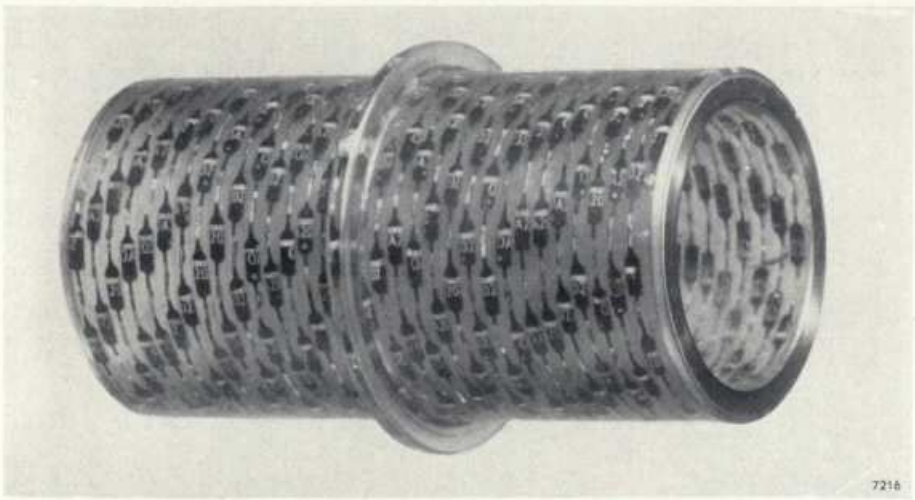


Fig. 3. De zuil met gelijkrichters van de cascadegenerator. Een aantal van 2 × 175 siliciumdiodes OA 202 is gerangschikt langs een schroeflijn en terwille van de hoogspanningsisolatie ingegoten in giethars.

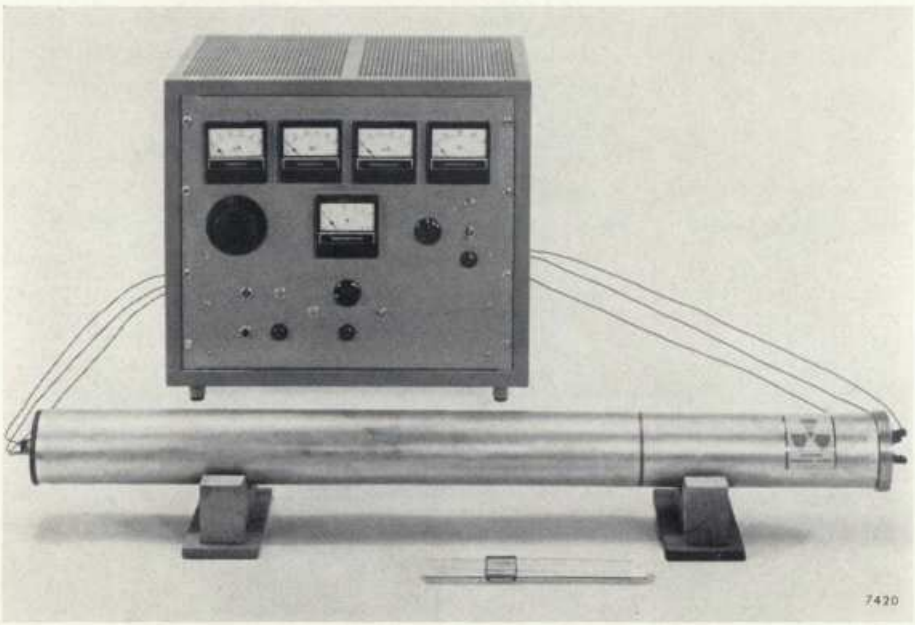


Fig. 4. Combinatie van de experimentele hoogspanningsgenerator en de in het voorafgaande artikel van Reifenschweiler en Nienhuis beschreven neutronenbuis. Het geheel bevindt zich in een isolerende buis met geaard omhulsel (diameter 10 cm). De rondom de buis getrokken streep geeft de plaats van de trefplaat aan, het waarschuwingsteken wijst op het tritium dat zich in de neutronenbuis bevindt. Achter de buis ziet men het bijbehorende toestel voor voeding en regeling.

Een dergelijke combinatie zou bijzonder aantrekkelijk zijn voor het neerlaten in boorgaten bij het zoeken naar oliehoudende lagen, daar dan geen lange hoogspanningskabel nodig is.

De soorten giethars die men in de handel kan krijgen, hebben voortreffelijke isolatie-eigenschappen maar het nadeel van een slechte warmtegeleiding. Dit beperkt de mate waarin men met giethars geïsoleerde hoogspanningsgeneratoren kan belasten. Een belasting van 20 W, dus van 200 μA bij 100 kV, is echter toelaatbaar.

In de in fig. 1 getekende vorm van de generator is de niet-geaarde uitgangsklem positief. De uitgangsspanning kan gemakkelijk omgekeerd worden door de transformator en de eerste buitencondensator naar het andere eind van de zuil over te brengen. Hetzelfde moet dan geschieden met de dempweerstand.

De titelfoto toont de generator in werking, belast met een meetweerstand.

Een dergelijke miniatuur-hoogspanningsgenerator kan in laboratorium en fabriek op vele wijzen van nut zijn. Een bijzonder belangrijke toepassing is die bij het opsporen van oliehoudende lagen met behulp van de neutronenbuis die in het vorige artikel beschreven is. De diameter van de complete hoogspanningsgenerator moet dan passen bij die van de neutronenbuis, zodat men ze samen in het boorgat kan laten zakken en een lange hoogspanningskabel dus overbodig is. Thans is een diameter van 10 cm bereikt (*fig. 4*), gestreefd wordt nog naar een verkleining tot 7 cm, overeenkomend met de diameter van de neutronenbuis in de definitieve uitvoering.

Samenvatting. Beschreven wordt een viertraps-cascadegenerator volgens Greinacher voor 100 kV en 200 μA, die de vorm heeft van een buis met een buitendiameter van 9,6 cm (met geaard omhulsel 10 cm) en een lengte van 80 cm. Deze compacte constructie is verkregen door de generator uit te voeren in de vorm van *drie* zuilen, die ieder de vorm van een holle buis hebben en die in elkaar geschoven zijn. Een goede isolatie is deels verkregen met behulp van isolatiefoelie, deels door ingieten in giethars. De generator is geconstrueerd voor voeding met een wisselspanning van 50 Hz; gebruikt men een hogere frequentie, dan kan men volgens hetzelfde principe een generator bouwen die nog kleiner is. Getracht wordt, de diameter van de complete generator nog te verminderen tot die van de Philips neutronenbuis (7 cm), zodat hij samen met deze buis kan worden neergelaten in een boorgat voor het opzoeken van oliehoudende lagen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET INSTELLEN VAN DE IONENBUNDEL VAN EEN DEELTJESVERSNELLER

Foto Maurice Broomfield

Bij het kernfysisch onderzoek zijn „grote" versnellers in gebruik, zoals cyclotron en synchrocyclotron, maar ook verschillende „kleine", waarmee deeltjes kunnen worden versneld tot een energie van 1 MeV. Deze kleine versnellers worden meestal zodanig opgesteld dat het trefplaatgedeelte, dat gemakkelijk toegankelijk moet zijn, zich bevindt in een vertrek beneden dat waarin de hoogspanningsgenerator staat. De foto toont het trefplaatgedeelte van zo'n versneller (cascadegenerator in druktank), die door Philips voor een kernfysisch instituut is geconstrueerd. Worden ionen met betrekkelijk lage spanning versneld, dan is verblijf in de buurt van de trefplaat toelaatbaar. De lichtende ionenbundel is dan door een glazen isolator zichtbaar. Om nauwkeurig de plaats van de bundel te bepalen, kan men, zoals op de foto gebeurt, een aan een as bevestigd kwartsplaatje in de bundel brengen; op de getroffen plaats geeft dit fel licht. De trefplaat kan dan door middel van vier kartelschroeven (waarvan drie op de foto zichtbaar) in de juiste stand ten opzichte van de ionenbundel worden gebracht. Boven het verschuifbare trefplaatgedeelte bevindt zich een vacuümsluis; men kan dus lucht in het trefplaatgedeelte toelaten en dit verwisselen met handhaving van het vacuüm in de versneller zelf.

De hier afgebeelde eenvoudige, met water gekoelde, trefplaat voor het meten van de trefplaatstroom kan vervangen worden door (o.a.) een roterende trefplaat van zwaar ijs, die gekoeld wordt met vloeibare lucht. Bij beschieting met deuteronen van 800 keV is deze in staat, tot 10^{10} neutronen per seconde te leveren [1]), volgens de reactie $D(d,n)^3He$.

[1]) A. C. van Dorsten en J. H. Spaa, A high-output D-D neutron generator for biological research, Nucl. Instr. **1**, 259-267, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

FABRICAGE EN ONDERZOEK VAN LAKDRAAD

door R. J. H. ALINK *), H. J. PEL *) en B. W. SPEEKMAN **).

621.315.337

Lakdraad, dat voor het wikkelen van spoelen wordt gebruikt, is thans een der belangrijkste bouwelementen van de elektrotechniek. Onderstaand artikel beoogt in het kort een overzicht te geven van de praktijk van het fabriceren en van de problematiek die in de chemische en fysische structuur van de lakisolatie schuilt.

Tot de bouwstenen van de elektrotechniek behoort het wikkeldraad, d.i. geïsoleerd koperdraad, dienend voor het wikkelen van spoelen, van transformatoren, rotoren, statoren enz. Aanvankelijk gebruikte men voor dit doel koperdraad dat b.v. met rubber of met katoen was omgeven, tegenwoordig echter vrijwel uitsluitend gelakt koperdraad (lakdraad). Het grote voordeel van het isoleren met lak is dat volstaan kan worden met een zeer dunne isolatielaag en dat derhalve spoelen met een relatief grote vulfactor verkregen kunnen worden (d.w.z. waarbij een relatief groot deel van het volume van de spoel door koper is ingenomen).

De uiteenlopende eisen die in de elektrotechnische praktijk aan lakdraad gesteld worden, hebben geleid tot de ontwikkeling van een aantal typen, verschillend in de chemische samenstelling van de laklaag. Bij de N.V. Pope te Venlo fabriceert men in hoofdzaak de volgende vier typen:

a) Olielakdraad, het oudste type lakdraad [1]);
b) „Povin" draad, een mechanisch zeer sterk draad;
c) „Posyn" draad, een gemakkelijk soldeerbaar draad; de laklaag hiervan laat zich eenvoudig verwijderen door dompelen in gesmolten soldeertin;
d) „Potermo" draad, een draad dat goed bestand is tegen hoge temperaturen (tot ca. 155 °C).

Alle genoemde typen lakdraad worden, uitgaande van chemisch verschillende lakken, volgens ongeveer hetzelfde procédé gefabriceerd. In dit artikel geven we eerst een schets van dit procédé. Vervolgens houden we ons bezig met de eisen die aan lakdraad gesteld worden en het hiermee samenhangende keuringsonderzoek. Na deze hoofdstukken, die betrekking hebben op de praktijk, volgt een theoretische beschouwing, waarbij verband wordt gelegd tussen de voornaamste eigenschappen van de genoemde typen draad en de structuur van hun isolatielaag. Ten slotte wijden we speciale aandacht aan een recent onderzoek dat de aanwezigheid en het gevaar van microscopische „fouten" in de laklaag illustreert.

Fabricage

Voor het fabriceren van goed lakdraad streeft men ernaar de lak zo *dun* mogelijk op het draad aan te brengen, daar anders de lak zich tot druppels verenigt en zich dus ongelijkmatig over het draad verdeelt. Om de gewenste isolatiedikte te krijgen, die op een koperdraad van 0,1 mm diameter b.v. 16 μ kan bedragen, moet men dan een aantal laagjes van de lak over elkaar leggen. Het gebruikelijke procédé is, het draad enige malen beurtelings door een lakreservoir en een oven te trekken: bij het passeren van het lakreservoir wordt het draad met een dunne laag vloeibare lak bedekt, vervolgens wordt het in de oven gedroogd („gemoffeld"), daarna naar het reservoir teruggeleid om opnieuw van lak te worden voorzien, enz. — totdat de gewenste laagdikte bereikt is.

Bij de machines die men voor dit procédé toepast, onderscheidt men in hoofdzaak twee typen: bij het eerste wordt het draad horizontaal, bij het tweede wordt het verticaal door de oven getrokken. Machines van beide typen zijn resp. in de *fig. 1* en *2* afgebeeld.

Uit deze figuren blijken enige karakteristieke verschillen tussen de twee typen. Om de verschillen te kunnen begrijpen, het volgende.

De zwaartekracht maakt dat een horizontaal gespannen draadstuk enigszins in een boog (kettinglijn) hangt, wat voor de fabricage hinderlijk is. Derhalve moet de oven van de horizontale machine betrekkelijk kort zijn. Bij de verticale machine, waarbij zich deze moeilijkheid niet voordoet, zijn wel ovens van 10 meter en langer in gebruik. De korte horizontale machine heeft het voordeel dat het draad zich door één man laat opspannen. Het winstpunt van de lange verticale machine is dat het draad, bij een gegeven treksnelheid, langer in de oven verblijft. Dit is vooral van belang voor dikke soorten draad, waarbij de lak in relatief dikke lagen gelegd

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven. — Onze in 1959 overleden medewerker dr. Alink heeft o.m. een reeks onderzoekingen aan lakdraad verricht, waarvan de resultaten in dit artikel mede zijn verwerkt.
**) N.V. Pope's Draad- en Lampenfabrieken, Venlo.
[1]) Zie b.v. J. Hoekstra, Philips techn. T. **3**, 40, 1938.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

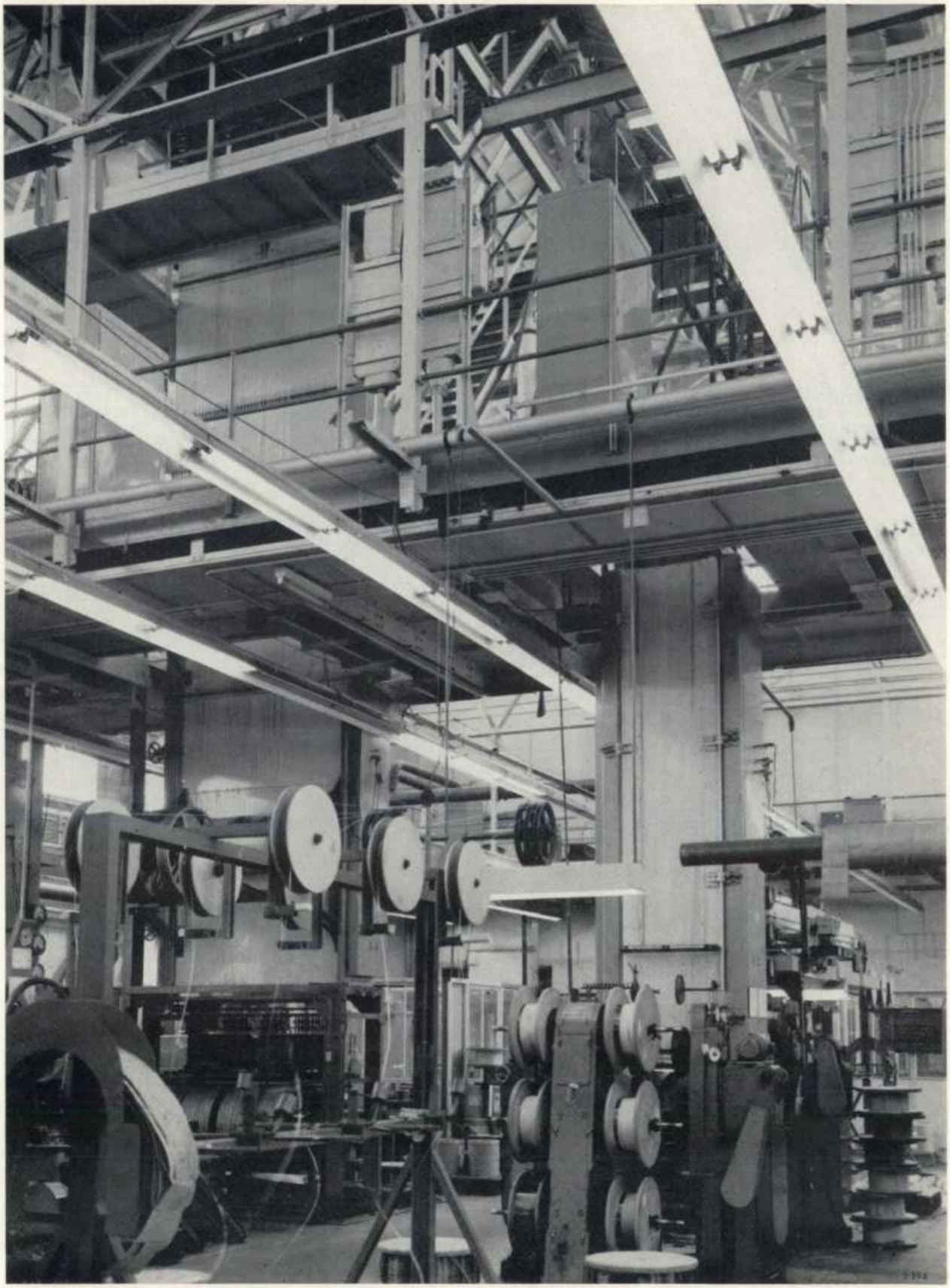


Fig. 1. Twee verticale machines voor het fabriceren van lakdraad. De linkse machine heeft een hoogte van 14 meter. Elk dezer machines verwerkt een aantal draden tegelijk, die ieder weer een aantal malen afwisselend door een lakreservoir en door een oven worden getrokken. Zie verder de figuren 3 en 4.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt, en die daardoor een vrij lange droogtijd nodig hebben.

In het algemeen zal men om economische redenen ernaar streven dat een machine een aantal draden tegelijk bewerkt. Het voordeel hiervan gaat evenwel verloren indien vaak draadbreuk optreedt en telkens door de breuk van één draad de afwerking van de gehele bespanning van de machine gestagneerd wordt. Bij dikke draden komt breuk zelden voor, maar bij dunne draden is het een mogelijkheid waarmee men ter dege rekening moet houden. Zo komt men bij de lakdraadfabricage logischerwijze tot de ontwikkeling van een machinepark waarbij dunne draden worden gefabriceerd op horizontale machines die één draad per machine verwerken (fig. 1), en waarbij dikke draden, met 8 of meer tegelijk, in verticale machines worden gefabriceerd (fig. 2).

De *fig. 3* en *4* laten enige details zien van een verticale machine, die 16 draden tegelijk lakt. Bij elk van deze draden wordt de lak in 6 lagen gelegd. Fig. 3 toont het lakreservoir aan de onderzijde van de machine. We zien hier $6 \times 16 = 96$ spleetvormige openingen in de schuin opstaande wand, waardoorheen de draden via een rol naar de erboven gelegen oven worden getrokken. Het is niet te vermijden dat door deze openingen ook een kleine stroom lak naar buiten treedt. Deze komt in een afvoergoot terecht en wordt vervolgens weer in het reservoir gepompt.

Fig. 4 toont de 16 apparaten die de gereedgekomen draden oprollen.

Keuringseisen en -methodes

Het gerede draad wordt op een reeks eigenschappen gekeurd. Van kardinale betekenis voor een wikkeldraad is de uniformiteit van zijn laklaag. Deze mag geen inhomogeniteiten of kratertjes vertonen en moet overal met gelijke dikte rondom het koper zijn aangebracht. Voorts zijn van groot belang de mechanische, elektrische en chemische eigenschappen van de laklaag. We zullen een greep doen uit de, in diverse normbladen beschreven, methodes die men toepast om het lakdraad op deze kwaliteiten te beoordelen.

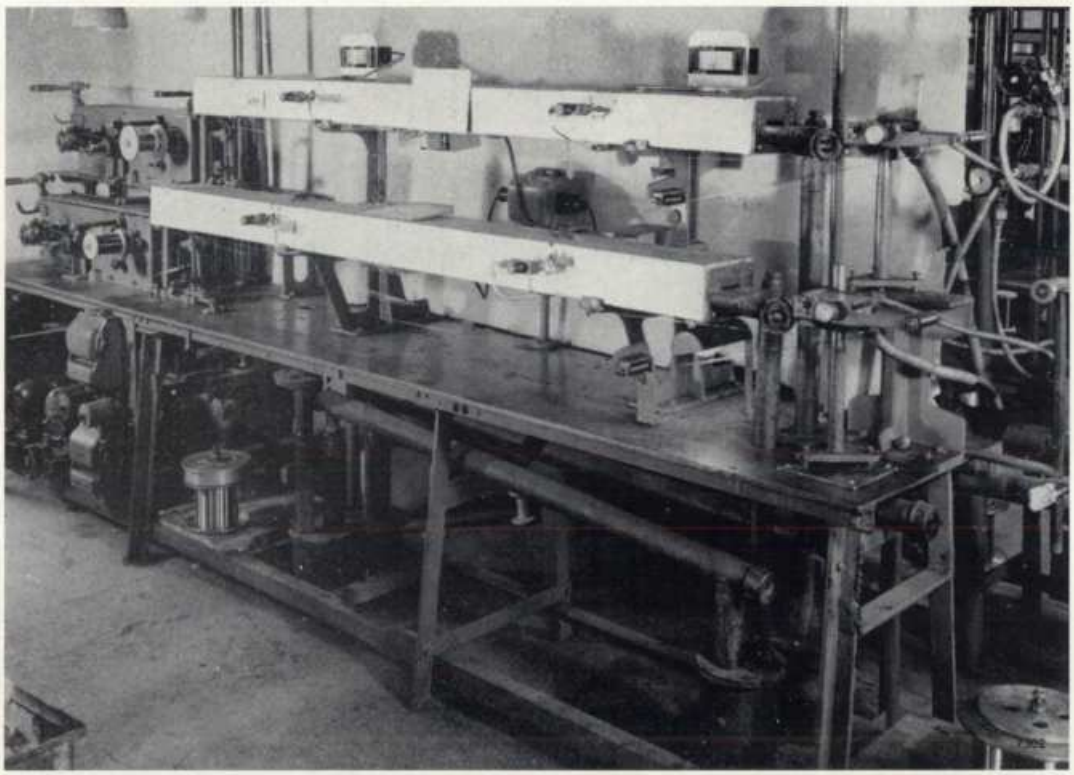


Fig. 2. Twee boven elkaar geplaatste horizontale machines voor het fabriceren van lakdraad. Het draad wordt in elke machine een aantal malen afwisselend door een lakreservoir en door een oven geleid.

Voor het opsporen van gaten en andere grove isolatiefouten trekt men het draad door een geleidende vloeistof (kwik of keukenzoutoplossing), waarbij de polen van een spanningsbron op de draadkern en de vloeistof worden aangesloten. In de stroomketen zijn verder opgenomen: een weerstand, een neonlampje en een telapparaat. Is de isolatieweerstand

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

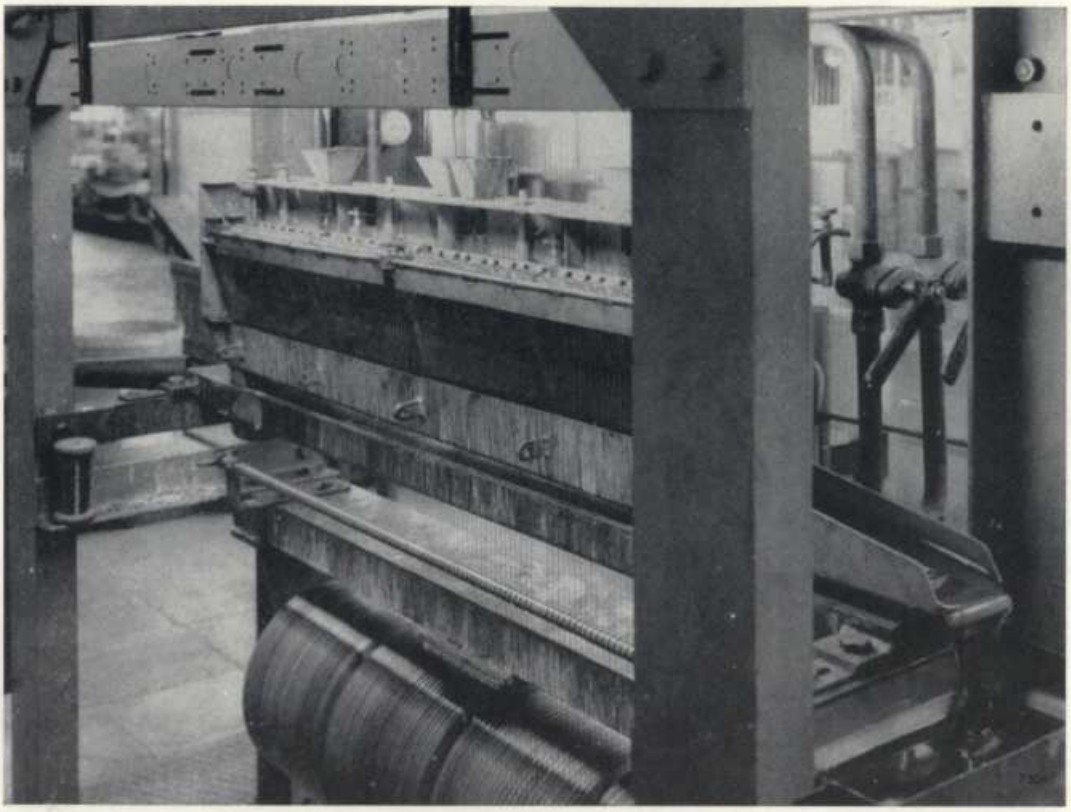


Fig. 3. Het lakreservoir van een verticale machine. Met deze machine worden 16 draden tegelijk voorzien van een uit 6 lagen bestaande isolatie. We zien hier hoe het draad omhoog wordt getrokken, door 96 spleetvormige openingen in de wand, naar de erboven gelegen moffeloven. De kleine stroom lak, die door deze spleten naar buiten treedt, wordt in een goot opgevangen en vervolgens weer in het lakreservoir teruggepompt. Met behulp van een kleurmonster (de klos links) wordt beoordeeld of het draad voldoende gemoffeld is. De kleur van het lakdraad is nl. donkerder naarmate men het langer of op hogere temperatuur heeft gemoffeld. Is de kleur, vergeleken met het monster, te licht of te donker, dan wordt de snelheid waarmee men het draad door de machine trekt resp. verlaagd of verhoogd.

Fig. 4. Draaiende vaatjes waarin 16 gereedgekomen lakdraden, afkomstig van de machine erachter, worden „opgespoeld".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de laklaag ergens in het ondergedompelde stuk kleiner dan b.v. 10 000 Ω, dan gaat er een stroom door de keten lopen die het neonlampje doet oplichten en het telapparaat in werking stelt (zie *fig. 5*).

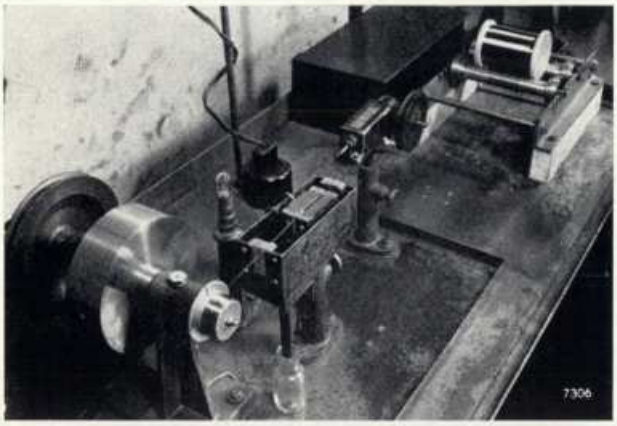


Fig. 5. Een apparaat voor het opsporen van (vrij grove) fouten in de isolatie van lakdraad. De motor links trekt het te onderzoeken draad door een bak met kwik. Het kwik en de kern van het draad zijn tezamen met een neonlampje en een telapparaat in een stroomketen opgenomen. Fouten in het passerende draad waar de isolatieweerstand kleiner is dan 10 000 Ω, doen het lampje oplichten en het telapparaat in werking treden.

Een gelijkmatige dikte van de laklaag is niet alleen van belang met het oog op de isolatieweerstand, maar ook omdat voor bepaalde wikkelmethodes van spoelen een zeer constante draaddiameter vereist is (spreiding minder dan 2%). Op de vrij eenvoudige keuringsmethodes voor de draaddikte gaan we hier niet in.

Om de laagsgewijze bouw van de lakisolatie op gemakkelijke en snelle wijze te controleren, plaatst men het te onderzoeken draad gedurende ca. 1 minuut onder een hoek van 45° in een reagens dat in staat is de lak op te lossen. Er komt dan op het draad een scheve doorsnede van de lakisolatie te zien, waarin men met een loep duidelijk de diverse lagen onderscheidt, zoals *fig. 6* demonstreert.

De mechanische keuring behelst een onderzoek naar uiteenlopende eigenschappen als slijtvastheid, buigbaarheid enz. Zo kent men slijtageproeven waarbij wordt nagegaan hoeveel slagen met een belaste, heen en weer gaande naald worden doorstaan,

Fig. 6. Een schuin afgeëtst stuk lakdraad, waarin de afzonderlijk opgebrachte laklagen te onderscheiden zijn.

eer de isolatie bezwijkt. Men beproeft de buigbaarheid en wikkelbaarheid door wikkelen om dunne „doornen", die ongeveer dezelfde diameter hebben als het draad zelf. Men verlangt bovendien dat een aldus gewikkeld stuk draad onbeschadigd blijft als het plotseling op hoge temperatuur wordt gebracht. Deze eis, die tot de zwaarste behoort waaraan het draad moet voldoen, is voornamelijk van belang in verband met de bewerkingen die een spoel na het wikkelen kan ondergaan („compounderen" of impregneren).

Wat de elektrische eigenschappen van de lakisolatie betreft, is vooral de doorslagspanning een belangrijk gegeven. Het bepalen hiervan gebeurt b.v. door een stuk draad om een gepolijste stalen cilinder te winden, waarna tussen de draadkern en de cilinder een spanning wordt aangelegd, die men geleidelijk opvoert. Andere elektrische eigenschappen die men wenst te kennen, zijn de isolatieweerstand en de diëlektrische verliezen. Op de meting van de isolatieweerstand om de fysische structuur van de laklaag te onderzoeken, wordt op blz. 365 ingegaan.

De chemische eigenschappen van de laklaag die de elektrotechnicus interesseren, zijn in het bijzonder het thermisch verouderen en de bestandheid tegen oplos- en impregneermiddelen. Met uitzondering van het thermisch verouderen, waarop we aan het slot even terugkomen, zullen we dit onderwerp verder laten rusten: met details hierover zouden we ons al te ver in de praktijk van het onderzoek begeven. We beschouwen nu het lakdraad vanuit een theoretische gezichtshoek.

Verband tussen de chemische structuur en de eigenschappen van de laklaag

Het is moeilijk, maar dankbaar werk te trachten een verband te leggen tussen de aan lakdraad waargenomen eigenschappen en de chemische samenstelling van de toegepaste lakken. We zijn er nog ver van, een compleet inzicht in deze materie te kunnen geven, maar wat men heeft bereikt, is reeds waard te worden vermeld.

Algemene bouwprincipes van draadlakken

Lakken kan men verdelen in twee groepen: fysisch drogende en chemisch drogende.

Een fysisch drogende lak bestaat uit een vluchtig oplosmiddel en een daarin opgeloste macromoleculaire stof, b.v. nitrocellulose. Bij aanbrengen van een dergelijke lak op een voorwerp verdampt het oplosmiddel, terwijl de rest een laag op het voorwerp vormt. Dit proces vindt zonder chemische veranderingen plaats, dus zonder dat de moleculen zich met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

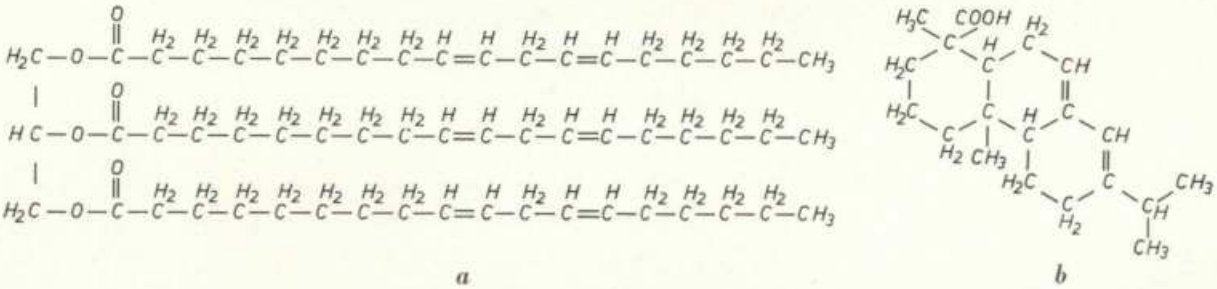
elkaar verbinden. De gevormde laklaag is dan ook weer oplosbaar in het oorspronkelijke oplosmiddel, en ook is de laag geneigd week te worden bij verhitting. Men spreekt daarom ook wel van thermoplastische lakken.

Een laklaag met geheel andere eigenschappen verkrijgt men indien de moleculen van de desbetreffende lak zich wèl met elkaar verbinden en aldus een driedimensioneel netwerk doen ontstaan, zoals dit bij de chemisch drogende lakken het geval is. De hiermee gevormde laag vertoont bij verhitting niet de neiging week te worden, ook is de laag bestand tegen de gebruikelijke oplosmiddelen, al zal in bepaalde gevallen enige zwelling kunnen optreden.

van plaatselijk wordt ingesnoerd en breekt. Heeft daarentegen het moleculaire netwerk zich overal stevig aan het koper gehecht, dan wordt de laklaag gemakkelijk, zonder breken, met het koper méégerekt.

Een derde algemeen „bouwprincipe" der draadlakken bespreken we aan de hand van het oudste lakdraadtype, het olielakdraad.

Bij het bereiden van olielak bedienen we ons van een werkwijze die reeds in de vorige eeuw werd toegepast o.a. voor de bereiding van rijtuiglak. Hiervoor werden als hoofdbestanddelen in de natuur voorkomende harsen (colofonium, kopalen) en drogende oliën (lijnolie, houtolie) gebruikt. Ook



a *b*

Fig. 7. De chemische structuur van *a*) een oliebestanddeel (glycerolester van 9,12-linoleïnezuur) en *b*) een harsbestanddeel van olielak (abiëtinezuur).

Het zal duidelijk zijn dat alleen de tweede soort lakken, de zg. thermohardende lakken, voor isolatie van draad in aanmerking komen. Thermoplastische lakken gebruikt men in sommige gevallen voor het leggen van een extralaagje op een reeds met thermohardende lak geïsoleerd draad („Thermoplac" draad). Bij verwarmen van een hiermee gewikkelde spoel zal dit extralaagje week worden en daardoor een samenhechten van de windingen teweegbrengen. Dit is o.m. van belang voor spoelen die men zonder steunlichaam een vaste vorm wil geven, zoals de deflexiespoelen voor televisiebeeldbuizen. In hetgeen volgt, zullen we echter zulke thermoplastische laklagen buiten beschouwing laten en uitsluitend spreken over de eigenlijke isolatielak, die dus moet voldoen aan de genoemde voorwaarde dat de moleculen een driedimensioneel netwerk vormen.

Een tweede voorwaarde is dat het gevormde driedimensionele netwerk zich stevig aan het koper hecht. Dit kan als volgt worden toegelicht. Uiteraard moet men aan de laklaag van wikkeldraad de eis stellen dat deze de bij het wikkelen optredende *rek* verdragen kan. De koperen kern zelf, mits op geschikte wijze vervaardigd, is hiertoe in staat. Uit experimenten blijkt nu dat een „vrij" lakhuidje nauwelijks enige rek vertoont, maar in plaats daarvoor de moderne draadlakken op oliebasis gebruikt men nog steeds de natuurlijke drogende oliën als voornaamste grondstof. De natuurlijke harsen hebben echter plaats moeten maken voor synthetische harsprodukten. De voordelen hiervan zijn dat een grotere constantheid van samenstelling en een groter gamma van eigenschappen gerealiseerd kunnen worden.

Zowel in de oude als in de nieuwe olielak onderkennen we als belangrijk structuurprincipe, hetwelk bij elke draadlaksoort min of meer duidelijk teruggevonden wordt, dat er een zekere „balans" bestaat tussen bestanddelen van een flexibel karakter en tamelijk starre bestanddelen. De eerste worden hier gerepresenteerd door de drogende oliën, met hun lange lineaire koolwaterstofketens, de tweede door de harsen, waarin veel ringvormige molecuulstructuren voorkomen (zie *fig.* 7).

Wordt het beschouwde moleculaire netwerk gevormd alléén door flexibele bestanddelen, zoals b.v. bij rubber het geval is, dan verkrijgen we een zeer elastisch produkt, dat echter het nadeel heeft week te zijn en geneigd tot zwellen in allerlei oplosmiddelen: de moleculen hiervan kunnen gemakkelijk in de „losse" netwerkstructuur doordringen en deze doen uitzetten. Omgekeerd zal de vorming van een netwerk alléén uit starre bestanddelen — we denken

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hierbij b.v. aan sommige soorten kunsthars — een weliswaar hard, maar bros produkt doen ontstaan.

Juist de toegepaste combinatie van harsen en drogende oliën maakt olielakdraad uitstekend bruikbaar als wikkeldraad: het paart een goede buigbaarheid aan een behoorlijke bestandheid tegen mechanische en chemische invloeden.

Aldus hebben we enkele algemene structuurprincipes leren kennen. We zullen nu laten zien hoe men ook individuele eigenschappen van bepaalde typen lakdraad tegen hun structurele achtergrond kan begrijpen.

„*Povin*" *draad*

Als eerste voorbeeld bekijken we de geheel synthetisch bereide lak voor „Povin" draad. Ook deze lak bestaat uit twee hoofdbestanddelen, die de boven beschreven „balans" vertegenwoordigen. Het eerste bestanddeel is het polyvinylformal, waarvan het molecuul gekenmerkt is door a) een overwegend lineaire bouw, b) in het molecuul voorkomende ringsystemen van het type 1-3-dioxaan, en c) een groot aantal hydroxyl- en acetaatgroepen (zie *fig. 8*). Het tweede bestanddeel is een hars die onder de naam „Novolak" in de handel wordt gebracht. Hiervan zij alleen vermeld dat deze voornamelijk uit starre groeperingen bestaat en verder een aantal hydroxylgroepen bevat.

Welke chemische omzettingen tussen deze bestanddelen bij de fabricage plaatsvinden, is nog niet geheel duidelijk. Men neemt aan dat zowel de hydroxylgroepen van het polyvinylformal als die van de „Novolak" hars een rol spelen bij het tot stand komen van een driedimensioneel netwerk. Dit zal echter, anders dan bij olielak, geen sterk verknoopt netwerk zijn. Daartoe biedt de chemische structuur te weinig mogelijkheden.

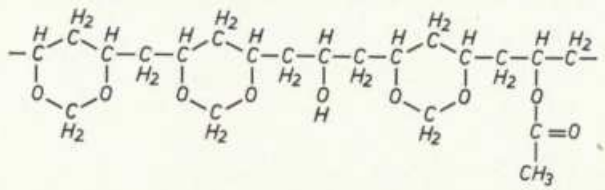


Fig. 8. De chemische structuur van polyvinylformal, een voornaam bestanddeel van de isolatie van „Povin" draad.

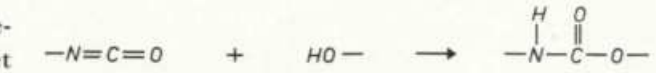
Wel bestaan er vele mogelijkheden voor het vormen van fysische bindingen, nl. van waterstofbruggen. Deze zullen gevormd kunnen worden tussen de hydroxylgroepen van de „Novolak" hars en de zuurstofatomen van de dioxaanringen van het polyvinylformal.

Zo zal er dus, behalve het wijdmazige „losse" netwerk van chemische bindingen, een nauwmazig netwerk van waterstofbruggen ontstaan. Ieder van deze waterstofbruggen is zwakker dan een chemische binding, maar door hun grote aantal zullen zij de structuur toch zeer stevig maken. Voor een draadlak is een dergelijke structuur bij uitstek geschikt. Men mag immers verwachten dat bij buigen, waarbij sterke spanningen in de laklaag worden opgewekt, de vrij zwakke waterstofbruggen verbroken zullen worden. Zij zullen dus tijdens het buigen nauwelijks als beletsel werken, terwijl het verbreken toch geen duurzame schade meebrengt. Ontlaat men nl. de opgewekte spanningen, b.v. door kortstondige verwarming, dan vormt zich onmiddellijk een nieuw net van waterstofbruggen, waardoor de oude sterkte herwonnen wordt! Aldus verklaart men de uitstekende mechanische eigenschappen van „Povin" draad, waarop we in het begin doelden.

„*Posyn*" *draad*

Van „Posyn" draad is, zoals gezegd, de meest typische eigenschap dat zijn laklaag zich laat verwijderen door dompelen in gesmolten soldeertin. Ook in dit geval is het verband met de chemische structuur van de laklaag goed te zien.

De chemische bindingen die hier voor een belangrijk deel het netwerk bijeenhouden, ontstaan door de reactie:



waarin een isocyanaatgroep zich met een hydroxylgroep verbindt. Nu is deze reactie een evenwichtsreactie, die bij hoge temperatuur in omgekeerde richting verloopt. Bij dompelen in gesmolten tin valt, als gevolg van deze omkering van de reactie, het driedimensionele netwerk uiteen in losse brokstukken met klein molecuulgewicht. Deze brokstukken verdampen, en het hierdoor blootgelegde koper komt vertind uit het soldeerbad te voorschijn.

„*Potermo*" *draad*

De netwerkstructuur van de lak van het sinds kort ontwikkelde „Potermo" draad is een der minst ingewikkelde. Het netwerk wordt hier gevormd door verestering van tereftaalzuur met eenvoudige polyalcoholen zoals ethyleenglycol en glycerol. De opbouw van een deel van het netwerk uit de bestanddelen, die hierin in telkens wisselende volgorde aan elkaar gekoppeld zijn, is weergegeven in *fig. 9*.

De uitstekende temperatuurvastheid van het „Potermo" draad berust blijkens onderzoekingen hierop dat zuurstof uit de lucht er slechts een ge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ringe invloed op heeft. Waarom nu juist een netwerk als het weergegevene weinig gevoelig is voor zuurstof, is nog niet geheel duidelijk, maar zo onverwacht is dit toch niet: het beschreven netwerk immers bestaat vrijwel uitsluitend uit benzeenringen en estergroepen, en het is wel bekend dat deze niet gemakkelijk met zuurstof reageren. De overige groepen zijn vermoedelijk door de tegen zuurstof resistente groepen voldoende afgeschermd.

Uit het bovenstaande is wel gebleken welk een ingewikkeld samenspel van factoren de kwaliteit van lakdraad bepaalt. In werkelijkheid is de zaak nòg gecompliceerder, want niet alleen de eigenlijke structuur, maar ook „fouten" in de structuur hebben hier invloed op. Aan dit belangrijke onderwerp, in het bijzonder aan een onderzoek op dit gebied, in het Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven verricht, wijden we het laatste hoofdstuk.

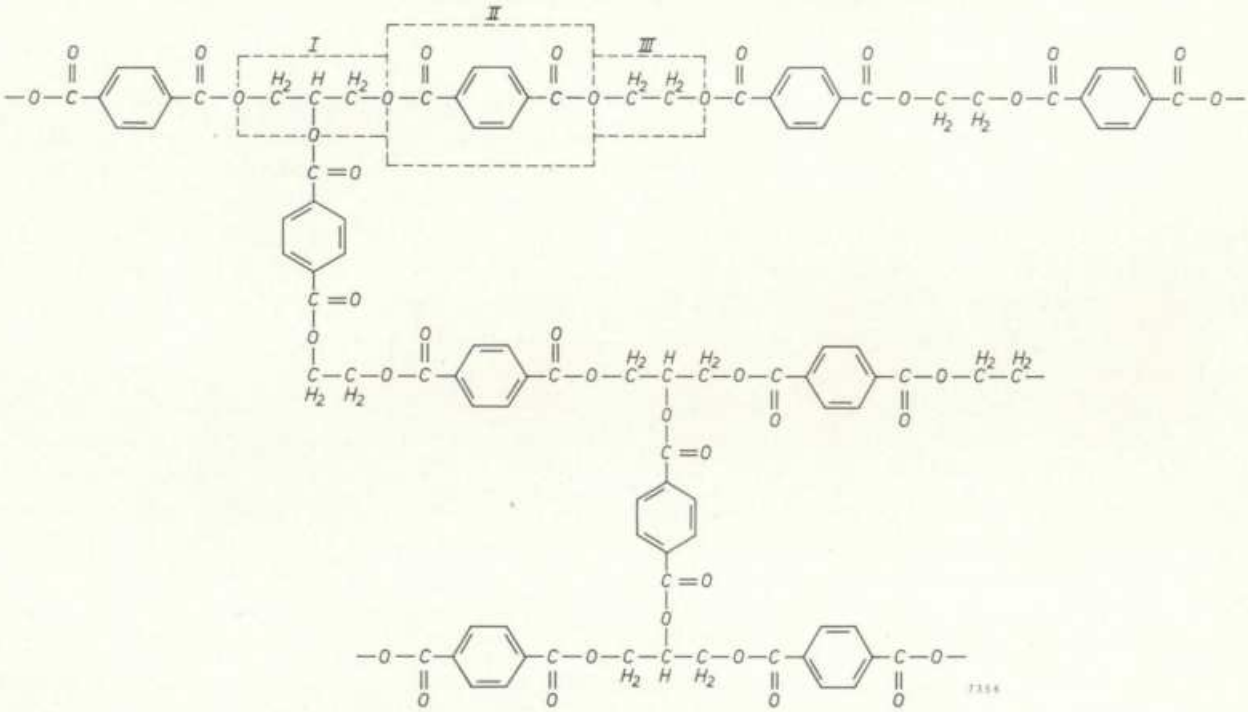


Fig. 9. Netwerkstructuur van de isolatie van „Potermo" draad. *I*: glycerol; *II*: tereftaalzuur; *III*: ethyleenglycol. Deze drie componenten treden in telkens wisselende volgorde op.

Onderzoek van „fouten", veroorzaakt door mechanische spanningen

In het voorgaande zijn methodes besproken waarmee men in het routineonderzoek tamelijk grove isolatiefouten aantoont. In het Natuurkundig Laboratorium heeft men zich sinds enige jaren beziggehouden met het ontwikkelen van meer verfijnde methodes, om daarmee lakdraad te bestuderen dat in een mechanische spanningstoestand verkeert. Het is hierbij gebleken dat men uit de isolatieweerstand van de laklaag, mits met gevoelige methodes gemeten, de aanwezigheid van zelfs microscopisch kleine scheurtjes die als gevolg van zulke spanningen zijn ontstaan, kan afleiden. Hoewel dit onderzoek zijn eindstadium zeker niet bereikt heeft, vormen reeds de eerste resultaten hiervan voldoende rechtvaardiging om het onderwerp alle aandacht te geven.

De eerste van de bedoelde methodes berust op de meting van de ontladingstijd van een condensator, gevormd door inklemmen van 1 m lakdraad tussen tinfoelie. De tinfoelie wordt met de aarde, en de draadkern met een elektrometer verbonden. Men laadt de condensator tot een bekende spanning, en men meet de tijd die hij nodig heeft om tot een bepaalde spanning te worden ontladen. Deze tijd hangt op elementaire wijze samen met de onbekende isolatieweerstand, en met de eveneens onbekende capaciteit. Om deze laatste onbekende te kunnen elimineren, moet nog een tweede meting verricht worden; hierbij neemt men een geijkte weerstand in parallelschakeling in de keten op.

Meting aan droog (en spanningsloos) lakdraad geeft voor alle typen draad, mits vrij van werkelijke gaten in de laklaag, een hoge waarde van de isolatieweerstand (b.v. 10^{13}-10^{14} Ω). Bij meting aan vochtig lakdraad wordt in het algemeen een betrekkelijk kleine verlaging van deze weerstand geconstateerd, welke verlaging voor de diverse typen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

draad karakteristieke verschillen vertoont. De verlaging neemt toe in de volgorde: olielakdraad - „Posyn" draad - „Povin" draad.

Dit beeld verandert aanmerkelijk indien wij het draad aan buigproeven onderwerpen en zodoende spanningen in de laklaag oproepen. Reeds bij een lichte buiging (buigingsstraal b.v. 1 m) van het draad doen zich, in vochtige toestand gemeten, aanzienlijke verlagingen van de isolatieweerstand voor (b.v. met een factor 10-100). Dit effect wordt bij snel buigen om een dunne doorn of om rechte hoeken dermate versterkt dat de methode in het geheel niet meer toepasbaar is, wegens een al te snelle ontlading van de condensator.

Voor een verdere bestudering gebruikt men de volgende methode. De kern van het onderhavige, sterk gebogen, draad wordt met de negatieve pool van een batterij verbonden en de draad wordt vervolgens gedompeld in een keukenzoutoplossing die wat fenolftaleïne bevat. De andere pool van de batterij wordt verbonden met een nikkelen staaf in dezelfde oplossing. Er komen onmiddellijk elektrolyse-effecten aan de dag: bij de knikken van het ondergedompelde draad ontwijken waterstofgasbelletjes en tegelijkertijd komen er OH^--ionen vrij, hetgeen men constateert aan het roodkleuren van het fenolftaleïne op de „buitenbocht" van elke knik. Dit is wat men zou verwachten als men aanneemt dat er door *rek* kleine scheurtjes kunnen ontstaan.

Bij lichte buiging geeft de beschreven methode een negatief resultaat, ook bij langdurige proefnemingen, hetgeen ons aanvankelijk gefrappeerd heeft.

Nauwkeurig microscopisch onderzoek vulde het tot dusver verkregen beeld der „foutjes" op bevredigende wijze aan. Bij snel buigen om dunne doornen ziet men na korte of lange tijd plotseling scheurtjes ontstaan door de laklaag heen. Ook bij langzame en zwakke buiging merkt men na verloop van tijd zeer kleine scheurtjes op. Deze haarscheurtjes strekken zich echter *niet* uit van het buitenoppervlak tot de kern, maar blijven beperkt tot enkele lagen van de isolatie. Aannemelijk is dat dergelijke scheurtjes wèl aanzienlijke weerstandsverlagingen, maar geen elektrolyse-effecten te zien geven. Veelal vloeien deze scheurtjes bij verwarmen dicht: ze zijn dan niet meer microscopisch waarneembaar en de isolatieweerstand blijkt gestegen te zijn. Deze haarscheurtjes zijn te beschouwen als tamelijk „ongevaarlijke" voorlopers van de scheurtjes die b.v. bij buigen om rechte hoeken ontstaan.

Voor een met lakdraad gewikkelde spoel zijn deze laatste scheurtjes funest, aangezien ze, indien de spoel inwendig vochtig is, het optreden van ongewenste stroompjes — en daardoor van sluiting — mogelijk maken. Bevat een dergelijk stroompje een gelijkstroomcomponent, dan veroorzaakt het bovendien, ten gevolge van elektrolyse, ernstige corrosie van het koperdraad. Deze kan zo ver gaan dat het koperdraad breekt.

Tot zover over dit onderzoek. De resultaten ervan werpen een interessant licht op diverse praktische ontwikkelingen uit de laatste tijd. Zo gaat men er in de praktijk meer en meer toe over de bij het wikkelen gebruikelijke rechthoekige spoelkokers en wikkelmallen te vervangen door kokers of mallen met afgeronde hoeken. Voorts wordt een kwaliteitsverbetering der spoelen nagestreefd door toepassing van vochtwerende materialen voor het gescheiden houden der wikkelingen.

Wat het begrijpen van de beschreven verschijnselen aangaat, zal het duidelijk zijn geworden dat de wetenschap in deze sector nog veel terrein op de

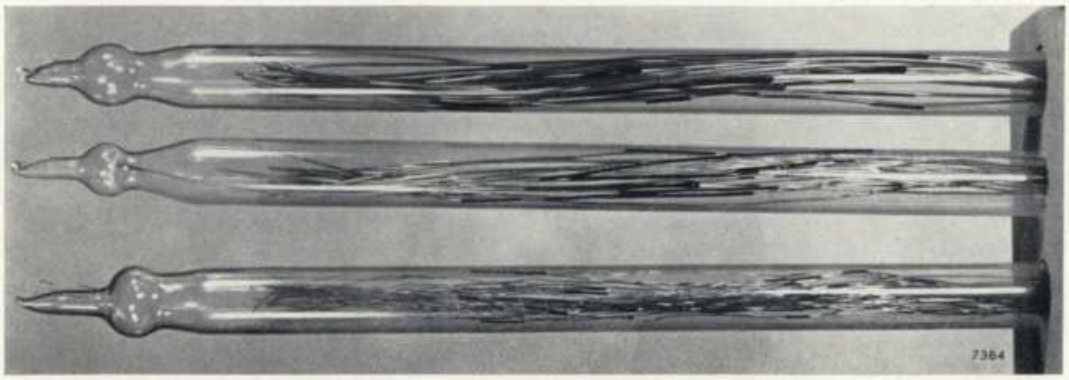


Fig. 10. Thermisch verouderen van „Posyn" draad in een afgesmolten buis, gedurende 48 uur bij 180 °C. Merkwaardig genoeg lijdt de isolatie onder deze omstandigheden meer schade dan bij thermisch verouderen aan de lucht, gedurende dezelfde tijd en bij dezelfde temperatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

empirie te veroveren heeft. Juist daardoor is hier buitengewoon veel dat boeit en intrigeert. Wij kunnen daarom dit korte overzicht van het werk met betrekking tot lakdraad niet beter besluiten dan met het geven van enkele voorbeelden van niet gemakkelijk te begrijpen verschijnselen. *Fig. 10* illustreert de merkwaardige complicaties die zich bij het thermisch verouderen van lakdraad voordoen. Volkomen anders dan men zou verwachten, geeft „Posyn" draad *in een afgesmolten buis* een aanzienlijk snellere ondergang van de isolatie te zien dan een zelfde soort draad die gewoon aan de lucht is blootgesteld. Dit verschijnsel treedt bij alle „soldeerbare" draden in meerdere of mindere mate op. Bij „Posyn" draad is dit niet zo geprononceerd, maar ook hier is het niet geheel onderdrukt. *Fig. 11* toont een serie ringvormige barsten die ontstaan indien een stuk „Povin" of „Posyn" draad in gebogen toestand in een oplosmiddel wordt gedompeld. Het verschijnsel, het zg. „solvent cracking", hangt ten nauwste samen met de mechanische spanningstoestand waarin de laklaag verkeert. Indien men nl. de draad na het buigen op 100-120 °C verwarmt, waardoor de aanwezige mechanische spanningen kunnen relaxeren, dan treden de barsten niet op. Merkwaardig is vooral ook dat de barsten bij olielakdraad geheel uitblijven.

Fig. 11. Een serie barsten (20× vergroot) in een stuk „Povin" draad ontstaan door dit te buigen en dan onder te dompelen in methanol. Voor dit zg. „solvent cracking" is nog geen geheel bevredigende verklaring gevonden.

Samenvatting. Lakdraad wordt gebruikt voor het wikkelen van spoelen, waarbij het aankomt op o.m. buigbaarheid en bestandheid tegen mechanische en chemische invloeden. Het draad wordt gefabriceerd met zg. chemisch drogende lakken. Laagje voor laagje wordt de lak aangebracht, door het draad herhaalde malen beurtelings door een lakreservoir en door een oven te leiden. Dun draad trekt men hierbij horizontaal, dik draad verticaal. Structurele voorwaarden voor het verkrijgen van een goede laklaag zijn a) de vorming van een driedimensioneel netwerk van atomen, dat b) stevig gehecht is aan het koper en dat c) zowel flexibele als starre elementen bevat. Dit laatste wordt toegelicht voor olielakdraad. Er wordt voorts een theoretische verklaring gegeven van de grote mechanische sterkte van „Povin" draad, van het opmerkelijke feit dat men bij „Posyn" draad door de laklaag heen kan solderen, en van de hittevastheid van „Potermo" draad. Ten slotte wordt een recent onderzoek naar microscopisch kleine „foutjes", ontstaan door mechanische spanningen, besproken en worden enkele vooralsnog niet gemakkelijk te begrijpen verschijnselen vermeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET SCHRIJVEN VAN ELEKTRONENBANEN MET BEHULP VAN EEN WEERSTANDSNETWERK EN EEN ANALOGON-REKENMACHINE

door A. J. F. de BEER *), H. GROENDIJK *) en J. L. VERSTER *).

537.533.3:621.517.729:681.14.001.57

In de elektronentechniek heeft men veelvuldig te maken met het probleem, de vorm van een elektronenbundel te beheersen; zo b.v. bij het ontwerpen van het focusseringssysteem van een elektronenmicroscoop, een röntgenbuis of een televisiebeeldbuis. Met behulp van een weerstandsnetwerk en een analogon-rekenmachine kan snel en nauwkeurig worden nagegaan op welke wijze een zeer nauwe elektronenbundel door een elektrostatische lens gefocusseerd wordt.

Het bepalen van de elektronenbanen in het elektrische veld van een gegeven elektrodenconfiguratie is een probleem dat zich bij het ontwerpen van vele soorten elektronenbuizen voordoet. Het berekenen van de velden zowel als van de banen daarin is een zeer tijdrovend werk. Daarom zijn er al sinds geruime tijd methodes ontwikkeld waarmee men dit kan bespoedigen. Een elegante manier om de elektronenbanen te weten te komen, is het laten rollen van kogeltjes op een rubbervel [1)][2)]. Deze methode is beperkt tot „tweedimensionele" velden en daardoor niet te gebruiken voor de meeste moderne buizen. De onlangs in dit tijdschrift beschreven elektrolytische trog met automatische baanschrijver [3)] heeft deze beperking niet en kan derhalve ook worden gebruikt voor algemene rotatiesymmetrische systemen, zoals b.v. de focusseringslens van televisiebeeldbuizen (*fig. 1*), maar is minder geschikt wanneer het gaat om banen in de nabijheid van de as van zo'n systeem (paraxiale banen). Het genoemde apparaat berust immers op het berekenen van de kromming van de baan. Deze is in het paraxiale geval steeds zeer klein, zodat de relatieve fout in de uitkomst te groot wordt.

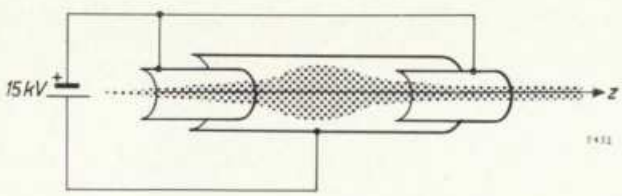


Fig. 1. Doorsnede van een elektrostatische focusseringslens van een televisiebeeldbuis. De lens bestaat uit drie coaxiale cilinders, die op verschillende spanningen worden gebracht. De dikte van de elektronenbundel is overdreven groot getekend.

We willen nu een andere methode beschrijven, die ons in staat stelt juist de paraxiale banen automatisch en met voldoende nauwkeurigheid te bepalen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een differentiaalvergelijking waarvan deze banen de oplossingen zijn. De coëfficiënten van de differentiaalvergelijking zijn functies van de potentiaal Φ op de as van het elektrodensysteem. Het verloop van Φ wordt bepaald met behulp van een *weerstandsnetwerk* [4)]. Een *analogon-rekenmachine* van het type PACE [5)] construeert de oplossingen van de differentiaalvergelijking. Deze oplossingen worden opgetekend door een x-y-schrijver. *Fig. 2* geeft een overzicht van de gehele opstelling.

Het principe van de baanberekening

Is z de coördinaat langs de symmetrie-as van het elektrodensysteem en r de afstand tot deze as, dan luidt de genoemde differentiaalvergelijking voor de banen $r(z)$:

$$4\,\Phi\,r'' + 2\,\Phi' r' + \Phi'' r = 0 \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin is Φ de potentiaal op de as, en accenten betekenen afgeleiden naar z. Deze vergelijking, waarin als coëfficiënten alleen de functie Φ op de as en afgeleiden van Φ in de richting van de as voorkomen, ontstaat uit de algemene differentiaalvergelijking voor de baan van een elektron in een elektrisch veld door beperking tot een rotatie-

*) Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

1) P. H. J. A. Kleijnen, De beweging van een elektron in tweedimensionale elektrostatische velden, Philips techn. T. **2**, 338-345, 1937.

2) G. Alma, G. Diemer en H. Groendijk, Elektronenbanen in ruimteladingsvelden nagebootst op het rubbermembraan, Philips techn. T. **15**, 26-34, 1953.

3) J. L. Verster, Een apparaat voor het automatisch schrijven van elektronenbanen, Philips techn. T. **22**, 257-271, 1960.

4) J. C. Francken, Het weerstandsnetwerk, een eenvoudig en nauwkeurig hulpmiddel voor het bepalen van potentiaalverdelingen, Philips techn. T. **21**, 11-24, 1959.

5) Deze machine, die gefabriceerd is door Electronic Associates, Long Branche, N.J., staat opgesteld in Philips' Rekencentrum te Eindhoven. — Aan het ontwerpen van de schakelingen voor het oplossen van ons probleem en het uitvoeren van de experimenten hebben W. P. J. Fontein en L. G. J. ter Haar van dit Rekencentrum meegewerkt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

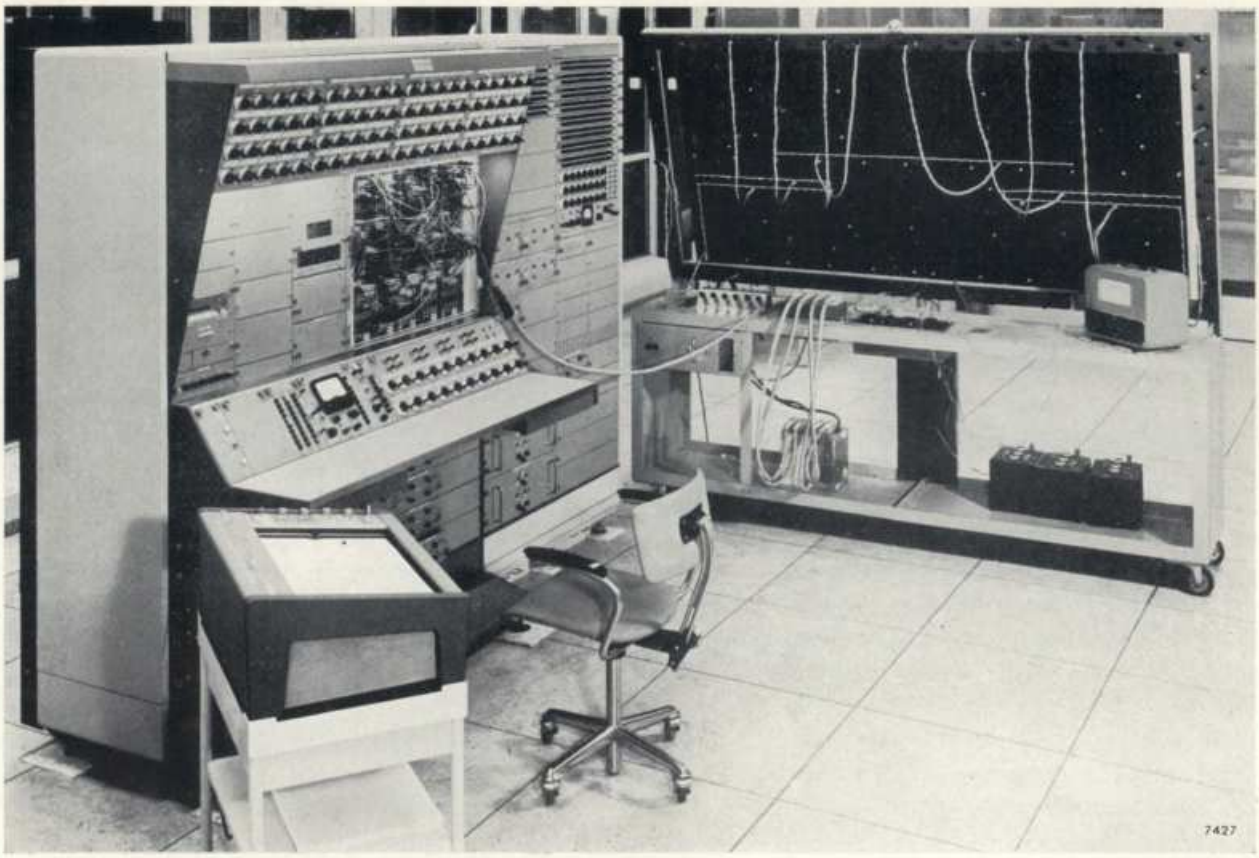


Fig. 2. Opstelling voor het automatisch schrijven van paraxiale elektronenbanen. Rechts staat het weerstandsnetwerk, waarop het model van het te onderzoeken elektrodensysteem voor de duidelijkheid met wit koord is aangebracht. Het koord is rond de contacten van de netwerkpunten gewonden, zodat men de maaswijdte duidelijk kan zien. De contacten zelf zijn door hun geringe afmetingen op de foto onzichtbaar. Links ziet men de analogon-rekenmachine van het type PACE, waarmee de berekeningen worden uitgevoerd. Met de x-y-schrijver op de voorgrond worden de gevonden banen opgetekend.

symmetrisch veld met bovendien de voorwaarde van kleine r en r' (paraxiale banen) [6]). Door de substitutie [7])

$$r = R\,\Phi^{-1/4} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

kan de vergelijking verder vereenvoudigd worden tot:

$$R'' + \frac{3}{16}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^2 R = 0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

de zg. vergelijking van Picht. Hierin komt geen tweede afgeleide van Φ meer voor. Omdat men in de regel tweede afgeleiden niet zo nauwkeurig kan bepalen als eerste afgeleiden, verdient deze vergelijking de voorkeur.

Om eerst globaal de gang van zaken bij het oplossen van deze differentiaalvergelijking door de analogon-rekenmachine te beschrijven, onderstellen we om te beginnen dat $(\Phi'/\Phi)^2$ een constante waarde K heeft. De lezer acceptere voorlopig dat de machine zo kan worden ingericht dat deze een spanning V genereert die als functie van de tijd t voldoet aan de met verg. (3) analoge vergelijking:

$$\frac{d^2V}{dt^2} + \frac{3}{16}KV = 0. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Deze spanning wordt met behulp van een x-y-schrijver opgetekend, waarbij de pen van de schrijver met een constante snelheid in de t-richting loopt. Wanneer we in de zo ontstane grafiek de V- en de t-as vervangen door resp. een R- en een z-as, dan hebben we één der oplossingen van de vergelijking (3) van Picht verkregen, nl. die met beginwaarden R en R' welke aan de ingestelde beginwaarden van V en dV/dt beantwoorden.

---

[6]) V. E. Cosslett, Introduction to electron optics, Clarendon Press, Oxford 1950, blz. 36.

[7]) De letter R zal in dit artikel ook gebruikt worden voor de elektrische weerstand. De kans op verwarring is echter klein, zodat we ons zullen houden aan deze symboolkeuze, die in de elektronenoptica internationaal gebruikelijk is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Omdat dit voor het verdere begrip van belang is, leggen we er de nadruk op dat in de machine het variëren van de z-coördinaat wordt vervangen door het verstrijken van de tijd, wat daarin uitkomt dat de pen van de schrijver zich met een constante snelheid in de z-richting beweegt.

Nu is in het hier beschouwde geval de coëfficiënt $(\Phi'/\Phi)^2$ niet constant, maar een functie van z. Wanneer men op dezelfde wijze met de analogon-rekenmachine de oplossingen wil construeren, dan moet het verloop van $(\Phi'/\Phi)^2$ aan de rekenmachine worden toegevoerd, en wel zó dat op het moment waarop bij het oplossen een willekeurig punt z_1 op de z-as is bereikt, een spanning aan de machine wordt toegevoerd waarvan de grootte evenredig is met de waarde van $(\Phi'/\Phi)^2$ in z_1.

Zoals gezegd, wordt het verloop van $\Phi(z)$ — waaruit $(\Phi'/\Phi)^2$ wordt berekend — bepaald met behulp van een weerstandsnetwerk. Voor deze globale beschrijving laten we in eerste instantie buiten beschouwing dat het weerstandsnetwerk het potentiaalverloop langs de as slechts geeft door de waarden voor een reeks discrete punten; we veronderstellen dus dat de potentiaal Φ door middel van een sleepcontact continu kan worden afgetast (*fig. 3*). De afgeleide Φ' in de richting van de as kan worden benaderd door het quotiënt $(\Delta\Phi/\Delta z)$ van het verschil tussen de potentiaalwaarden in twee dicht bij elkaar gelegen punten, z_1 en z_2, en de afstand tussen deze twee punten. Daartoe moet gebruik worden gemaakt van *twee* langs de as lopende sleepcontacten, S_1 en S_2. Een schakeling in de rekenmachine zelf deelt de zo verkregen waarde van Φ' door Φ en kwadrateert de uitkomst. Op hetzelfde moment waarop de twee langs de z-as lopende contacten de punten z_1 en z_2 passeren, verschijnt de bij z_1 behorende waarde van $(\Phi'/\Phi)^2$ aan de uitgang van de genoemde schakeling. (Het „rekenen" in een analogon-rekenmachine vraagt nl. geen rekentijd.)

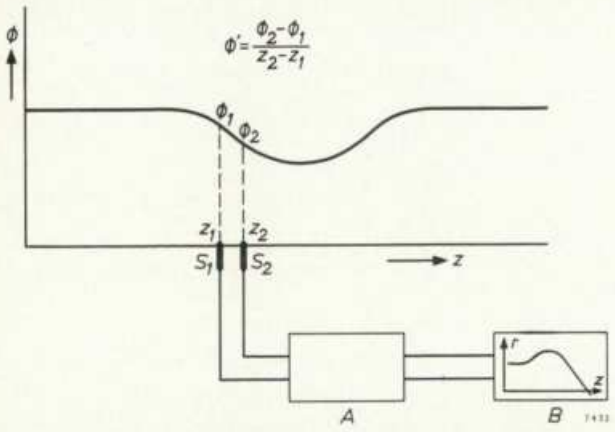


Fig. 3. Schematische voorstelling van het principe van de baanberekening. Het verloop van de potentiaal langs de z-as en van zijn afgeleide wordt met de twee sleepcontacten S_1 en S_2 afgetast. De rekenmachine A berekent daaruit de variabele coëfficiënt $(\Phi'/\Phi)^2$, die voorkomt in de differentiaalvergelijking van Picht, en lost deze vergelijking op. B is de x-y-schrijver.

Om het genoemde tijdsverband tussen het doorlopen van $(\Phi'/\Phi)^2$ en van $r(z)$ te waarborgen, moeten de contacten met dezelfde snelheid langs de z-as slepen als bij het oplossen de z-coördinaat wordt doorlopen. Een afwijkende snelheid betekent nl. dat, als het genoemde quotiënt $(\Delta\Phi/\Delta z)$ wordt berekend, Φ niet naar z wordt gedifferentieerd, maar b.v. naar az. Dit komt erop neer dat de factor 3/16 in verg. (3) wordt vervangen door $3/(16a^2)$, zodat dan een heel andere differentiaalvergelijking zou worden opgelost. In het onderstaande zal worden besproken hoe het vereiste tijdsverband wordt verkregen. Voorts zal worden uiteengezet hoe bij het weerstandsnetwerk, waarbij zoals gezegd de functie Φ niet continu kan worden afgetast, telkens door interpolatie een benaderende waarde van Φ en Φ' wordt bepaald. Een bijkomstig probleem dat we nog zullen behandelen, is, hoe voorkomen wordt dat de koppeling van de rekenmachine aan het weerstandsnetwerk de juiste potentiaalverdeling hierop verstoort.

Het oplossen van deze problemen heeft de moeite ruim geloond. Immers, tot nog toe was men gedwongen de desbetreffende spanningen afzonderlijk op het netwerk te meten en elke baan numeriek te berekenen — na enige oefening een werk van twee uur. De rekenmachine heeft voor hetzelfde werk maar 1 minuut nodig.

Voordat we op de genoemde kwesties nader ingaan, zullen we de voornaamste elementen bespreken waarmee de schakelingen in een analogon-rekenmachine worden opgebouwd.

Bouwelementen van een analogon-rekenmachine

De opteller

Fig. 4a geeft het in de techniek der analogon-rekenmachines gebruikelijke symbool voor een „opteller", terwijl in fig. 4*b* het schakelschema is weergegeven. De driehoek met gebogen voorkant A stelt een zg. operationele versterker voor, waarvan de belangrijkste eigenschappen zijn dat de versterking groot is (ca. 10^8 maal) en dat hij het teken van de spanning omkeert. Dit heeft tot gevolg dat er over de ingang i van de versterker nagenoeg geen spanning staat (potentiaal van p gelijk aan nul). Week deze ingangsspanning nl. een weinig van nul af, dan zou er aan de uitgang u een zeer grote tegengestelde spanning ontstaan, die via de tegenkoppelweerstand R_u de ingangsspanning onmiddellijk weer tot nul zou reduceren. Doordat de potentiaal van p

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

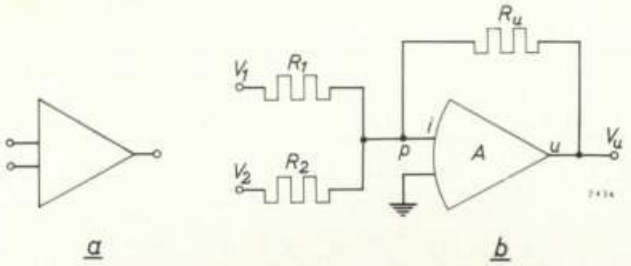


Fig. 4. *a*) Symbool en *b*) schakelschema van een opteller in een analogon-rekenmachine. Door de grote negatieve versterking van de zg. operationele versterker A blijft het punt p steeds op de potentiaal nul. De stromen V_1/R_1 en V_2/R_2 moeten te zamen door de tegenkoppelweerstand R_u afvloeien, doordat er geen noemenswaardige stroom loopt door de ingangsweerstand van A. Wanneer $R_u = R_1 = R_2$, dan is $V_u = -(V_1 + V_2)$.

steeds gelijk nul blijft, kunnen de stromen V_1/R_1 en V_2/R_2 die ontstaan wanneer de spanningen V_1 en V_2 aan de weerstanden R_1 en R_2 worden gelegd, niet naar aarde afvloeien. Ze zouden dan over de ingangsweerstand van A een spanning veroorzaken die de potentiaal van p ongelijk nul maakt. De genoemde stromen moeten daarom door de tegenkoppelweerstand R_u lopen. Noemen we de uitgangsspanning V_u, dan geldt dus:

$$\frac{V_u}{R_u} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right),$$

of

$$V_u = -\left(\frac{R_u}{R_1}\,V_1 + \frac{R_u}{R_2}\,V_2\right).$$

Men ziet het resultaat: de schakeling vermenigvuldigt V_1 en V_2 met resp. de negatieve constanten $-R_u/R_1$ en $-R_u/R_2$ en telt de produkten op. Omdat de versterker bij deze en andere elementaire wiskundige operaties wordt gebruikt, heeft men hem de naam „operationele" versterker gegeven.

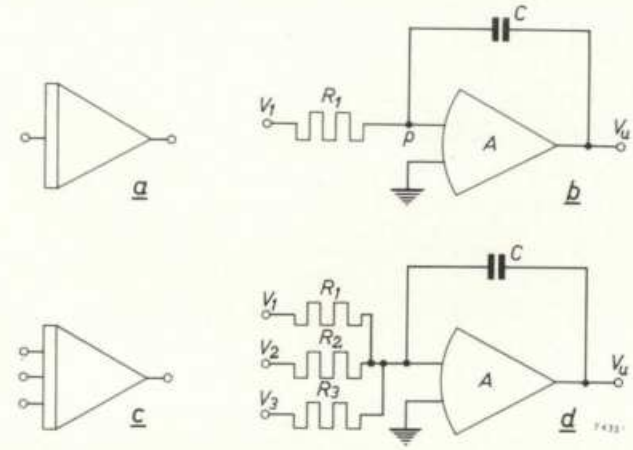


Fig. 5. *a*) Symbool en *b*) schakelschema van een integrator. Het punt p heeft weer de potentiaal nul. Evenals bij de opteller vloeit de stroom V_1/R_1 af door de tegenkoppelketen, die hier de condensator C bevat. Wanneer $R_1C = 1$ is, geldt $V_u = -\int V_1 dt$.
c) Symbool en *d*) schakelschema van een integrator die gelijktijdig optelt en integreert: $V_u = -\int(V_1 + V_2 + V_3)dt$.

Voert men slechts één spanning V_1 aan de ingang toe en kiest men bovendien $R_1 = R_u$, dan krijgt men aan de uitgang van deze schakeling niets anders dan het tegengestelde, $-V_1$. (Uiteraard tekent men dan bij het symbool, fig. 4*a*, ook maar één ingang.) Moeten V_1 en V_2 van elkaar worden afgetrokken, dan zijn er twee operationele versterkers nodig: de ene om $-V_1$ te maken, de andere om V_2 erbij op te tellen.

De integrator

In *fig. 5a* is het symbool van een integrator weergegeven, in fig. 5*b* het schakelschema ervan. De stroom V_1/R_1 moet weer geheel door de tegenkoppelketen vloeien, die in dit geval de condensator C bevat. Voor de uitgangsspanning V_u geldt nu:

$$\frac{V_1}{R_1} = -C\frac{dV_u}{dt}$$

of

$$V_u = -\frac{1}{R_1C}\int_0^t V_1 dt + V_u(0).$$

$V_u(0)$ is hierin de uitgangsspanning op het tijdstip $t = 0$. Door deze spanning een bepaalde waarde te geven, kan men de beginvoorwaarden van een differentiaalvergelijking invoeren. Kiezen we $R_1C =$ 1 seconde, dan vinden we voor V_u juist de waarde van de integraal van $-V_1$. Door een andere waarde voor RC te nemen, kunnen we de waarde van de integraal nog met een bepaalde constante vermenigvuldigen.

In de praktijk heeft een integrator steeds verscheidene weerstanden R_1, R_2, R_3, ... aan de ingang. Legt men aan b.v. drie van deze weerstanden spanningen V_1, V_2, V_3 (fig. 5*d*, met het bijbehorende symbool in fig. 5*c*) en kiest men $R_1C = R_2C = R_3C = 1$s, dan krijgt men aan de uitgang:

$$V = -\int (V_1 + V_2 + V_3)dt.$$

De vermenigvuldiger

In analogon-rekenmachines komen verschillende soorten vermenigvuldigers voor, waarvan we er hier slechts één behandelen, nl. de zg. servo-vermenigvuldiger. Het symbool en het schema zijn weergegeven in *fig. 6*. Langs de potentiometer P_1 stijgt de potentiaal van 0 tot de „referentiespanning" V_r, waarvoor meestal 100 volt wordt gekozen. De operationele versterker A_1 levert zolang een bekrachtiging voor de servomotor M totdat de spanningen aan de beide ingangen i' en i'' aan elkaar gelijk zijn

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

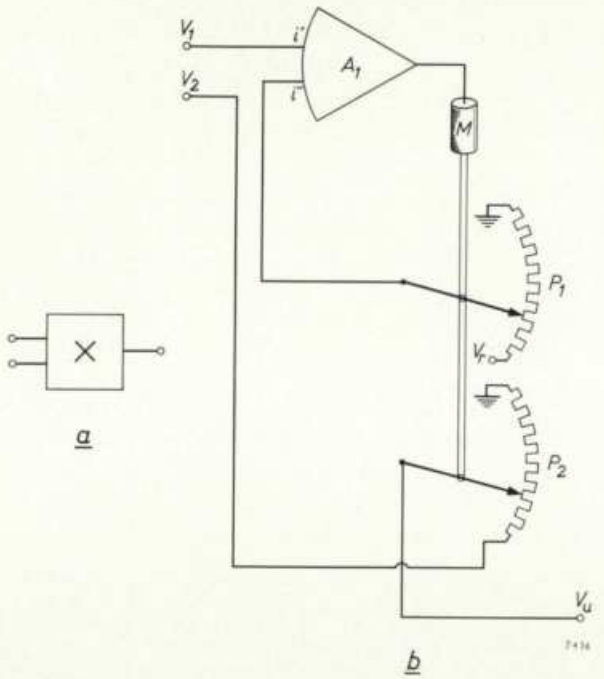


Fig. 6. *a*) Symbool en *b*) schakelschema van een vermenigvuldiger. *M* is een servomotor, waarmee de glijcontacten van de potentiometers, P_1 en P_2, gelijktijdig worden verplaatst. De versterker A_1 levert een bekrachtiging voor deze servomotor totdat de spanningen aan de beide ingangen i' en i'' aan elkaar gelijk zijn, d.w.z. totdat het glijcontact van P_1 op het punt staat waar de spanning gelijk V_1 is. De deelverhouding op de beide potentiometers is dan gelijk aan V_1/V_r, waarin V_r een referentiespanning is. Wanneer er een spanning V_2 aan de tweede potentiometer is gelegd, dan vinden we aan het glijcontact daarvan $V_u = V_1V_2/V_r$, d.w.z. op een constante factor na het produkt van V_1 en V_2.

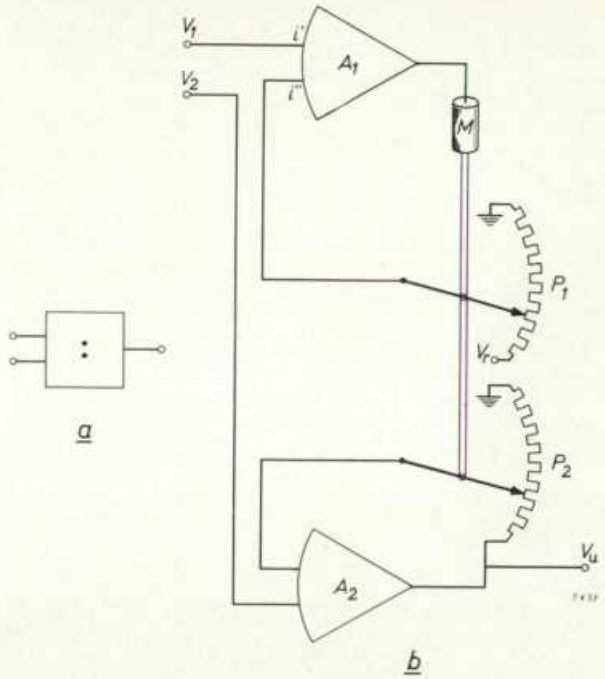


Fig. 7. *a*) Symbool en *b*) schakelschema van een deler, die het quotiënt V_2/V_1 maakt. De positie van de twee glijcontacten wordt geregeld zoals bij de vermenigvuldiger. Door de toegepaste normering is de deelverhouding op de beide potentiometers P_1 en P_2 gelijk V_1. De operationele versterker A_2 zorgt ervoor dat V_u die waarde krijgt waarbij het verschil tussen de spanningen aan zijn ingangen gelijk aan nul is. Er geldt dan $V_2 = V_1V_u$, waaruit volgt: $V_u = V_2/V_1$.

geworden, d.w.z. totdat het glijcontact van P_1 op het punt staat waar de spanning gelijk aan V_1 is. De deelverhouding a op de potentiometer P_1 is dan gelijk aan V_1/V_r. Omdat het glijcontact van de potentiometer P_2 met dat van P_1 mechanisch is verbonden, is de deelverhouding daarop nu ook gelijk aan V_1/V_r. Wanneer een spanning V_2 aan de potentiometer P_2 is gelegd, vinden we aan het glijcontact daarvan de spanning $V_u = aV_2 = (V_1 \times V_2)/V_r$, d.w.z. op een constante factor na het produkt van V_1 en V_2.

Om te voorkomen dat in de formules steeds deze constante factor staat, rekent men bij het ontwerpen van de schakelingen niet met de werkelijke rekenspanning [8]) V maar met het quotiënt V/V_r. Alle rekenspanningen worden daarmee genormeerd ten opzichte van de vaste referentiespanning. We zullen deze normering in het vervolg stilzwijgend toepassen en men dient dit bij het nagaan van de formules in gedachten te houden, aangezien de normering de rekenspanningen transformeert in dimensieloze grootheden.

Een vermenigvuldiger bevat meestal verscheidene potentiometers, b.v. vijf, waarvan alle glijcontacten mechanisch zijn verbonden met dat van de eerste. Men kan dan tegelijkertijd de produkten V_1V_2, V_1V_3, V_1V_4, enz. maken. Nemen we b.v. voor V_3 het reeds gevormde produkt V_1V_2, dan ontstaat $V_1^2V_2$.

De deler

Met behulp van de schakeling van *fig. 7* kan het quotiënt V_2/V_1 worden verkregen. Voor de verklaring van de werking kunnen we nu volstaan met de toelichting die in het onderschrift wordt gegeven.

De bovenstaande bouwelementen berusten alle op de toepassing van de elektronentechniek. Men kan ook uitgaan van andere bouwelementen, b.v. mechanische, zoals gedaan is door Bush, die voor het eerst een rekenmachine voor het oplossen van differentiaalvergelijkingen heeft geconstrueerd [9]). De

[8]) „Rekenspanning" ter onderscheiding van andere spanningen in de rekenmachine, die niets met de berekening hebben te maken.

[9]) V. Bush en H. L. Hazeu, Integraph solutions of differential equations, J. Franklin Inst. **204**, 575-615, 1927. Zie ook b.v. A. S. Jackson, Analog computation, McGraw-Hill, New York 1960. Naar het laatstgenoemde boek kunnen we verwijzen voor een verdere bestudering van theorie en toepassing van analogon-rekenmachines.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mechanische analogon-rekenmachines zijn dikwijls voldoende nauwkeurig, maar ze werken betrekkelijk langzaam.

Het oplossen van de differentiaalvergelijking van Picht

Om met de analogon-rekenmachine de differentiaalvergelijking van Picht op te lossen, schrijft men deze in de vorm:

$$R'' = -\frac{3}{16}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^2 R.$$

Men schakelt nu twee integratoren I_1 en I_2 (*fig. 8*) in serie en voert R'' (in de vorm van een met de tijd variërende spanning) aan I_1 toe. Tussen I_1 en I_2 vindt men dan $-R'$, terwijl I_2 de functie R zelf levert, die de oplossing vertegenwoordigt. Om R'' aan de integrator I_1 te kunnen toevoeren, wordt R'' met behulp van de beschreven bouwelementen, volgens de vergelijking in zijn bovengenoemde vorm, uit R en $(\Phi'/\Phi)^2$ berekend.

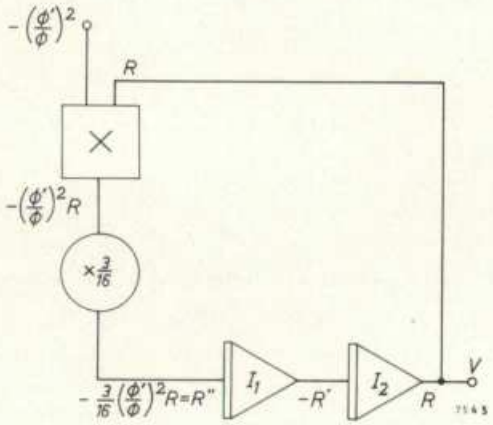


Fig. 8. Schakeling waarmee de vergelijking van Picht wordt opgelost. Als de machine gestart wordt, moet men R en $-R'$ de waarden $R(0)$ en $-R'(0)$ geven. De met deze beginvoorwaarden overeenkomende oplossing $R(z)$ wordt door de schakeling gegeven in de vorm van de variabele uitgangsspanning $V(t)$.

Men kan zich afvragen hoe dit mogelijk is, aangezien R immers pas door integratie uit R'' ontstaat. We hebben hier echter niet te maken met het achtereenvolgens uitvoeren van wiskundige bewerkingen, maar met een teruggekoppelde schakeling (een „lus"), waarin zodanige door de bouwelementen bepaalde stromen vloeien dat het verloop van de spanning V aan de uitgang een oplossing van de differentiaalvergelijking geeft.

Aangezien de schakeling fig. 8 voldoet aan dezelfde differentiaalvergelijking (in de „machineveranderlijken" V en t) als er geldt voor de elektronenbanen $R(z)$ (met de „probleemveranderlijken" R en z), kan men zeggen dat de schakeling een „analogon" is voor het gedrag van de elektronen in het elektrische veld. De naam analogon-rekenmachine drukt dit soort samenhang uit. Op het, misschien enigszins verwarrende, heen- en weergaan tussen de machineveranderlijken V en t en de probleemveranderlijken R en z (met welke laatste we verder in hoofdzaak zullen werken) hebben we de lezer hierboven reeds voorbereid.

Er is in de rekenmachine nog een aparte schakeling aanwezig waarmee de getransformeerde baancoördinaat R volgens (2) wordt teruggetransformeerd in de werkelijke baancoördinaat r, zodat de oplossing onmiddellijk in de gewenste vorm wordt gegeven.

Wanneer de condensatoren van de integratoren geladen zijn tot de spanningen die overeenkomen met de gekozen beginwaarden, wordt de machine gestart door het gelijktijdig sluiten van een aantal schakelaars. Onmiddellijk gaan dan de sleepcontacten de z-as van het netwerk aftasten en begint de pen van de schrijver de oplossing te tekenen. In elk punt z_1 is de teweeggebrachte uitwijking van de pen in de y-richting evenredig met de waarde van de baancoördinaat r in z_1. Na ongeveer één minuut hebben de contacten het eindpunt bereikt; de schrijver heeft dan één van de oplossingen van de differentiaalvergelijking (1) opgetekend.

Sleepcontacten en pen worden naar hun beginstand teruggebracht, de condensatoren in de integratoren worden ontladen, en de machine is klaar om een andere oplossing te schrijven. Daartoe worden bij het opnieuw starten andere beginwaarden aan R en R' gegeven.

In *fig. 9* zijn twee op deze manier gevonden banen afgebeeld.

Berekening van $(\Phi'/\Phi)^2$

We hebben al vermeld dat het verloop van de potentiaal Φ langs de as gevonden wordt met behulp van een weerstandsnetwerk. In zo'n netwerk zijn de weerstanden tussen alle naburige netwerkpunten zodanig gedimensioneerd dat de potentiaalverdeling over deze netwerkpunten een goede benadering is van de potentiaalverdeling in een axiale doorsnede van een rotatiesymmetrisch elektrodensysteem. Dit systeem wordt in het netwerk nagebootst door een aantal netwerkpunten elektrisch te verbinden en op een passende potentiaal te brengen [10]).

[10]) Zie voor een en ander het aangehaalde artikel [4]). — Dat het „model" van het te onderzoeken elektrodensysteem zo gemakkelijk op het weerstandsnetwerk kan worden gerealiseerd, is een van de grote voordelen van het netwerk ten opzichte van de elektrolytische trog: bij deze vraagt het vervaardigen van de elektrodemodellen heel wat tijd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

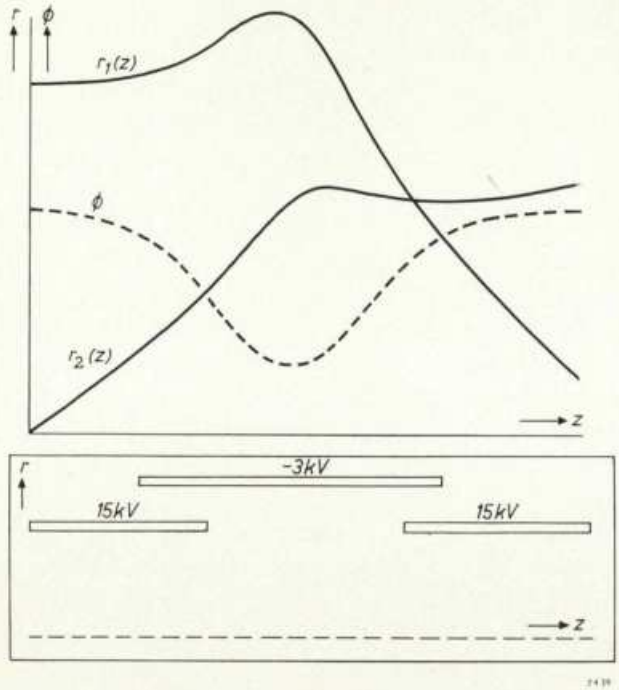


Fig. 9. Twee paraxiale banen $r_1(z)$ en $r_2(z)$ met verschillende beginvoorwaarden. Gestippelde lijn: verloop van de potentiaal Φ op de as van het elektrodensysteem. Een halve doorsnede van deze configuratie is onder de grafiek getekend; de schalen op de z-assen zijn aan elkaar gelijk.

Nu brengt het consequenties met zich mee dat het netwerk geen continu verloop van Φ geeft, maar slechts de waarden van Φ in discrete punten. Voor het oplossen van de differentiaalvergelijking van Picht dient er natuurlijk bij *elke* waarde van z een waarde van Φ gegeven te worden. Om dat te bewerken, wordt er (met behulp van de rekenmachine) geïnterpoleerd tussen de discrete punten. Hiertoe worden tegelijkertijd de waarden van Φ en Φ' in twee opeenvolgende netwerkpunten n en $n+1$ bepaald en de rekenmachine zorgt ervoor dat Φ en Φ' lineair met de tijd (dus ook met z) toenemen van de beginwaarden tot de eindwaarden in het beschouwde interval.

Deze lineaire interpolatie van Φ en Φ' tussen de punten n en $n+1$ (*fig. 10*) geschiedt volgens de formules:

$$U_n(x) = \Phi_n + (\Phi_{n+1} - \Phi_n)\frac{x}{a} \quad . \; . \quad (5a)$$

en

$$W_n(x) = \frac{\Phi_{n+1}-\Phi_{n-1}}{2a} + \left(\frac{\Phi_{n+2}-\Phi_n}{2a} - \frac{\Phi_{n+1}-\Phi_{n-1}}{2a}\right)\frac{x}{a} \quad . \; . \; . \quad (5b)$$

Hierin is: Φ_n de waarde van $\Phi(z)$ in het punt n, $U_n(x)$ de benadering van $\Phi(z)$ tussen de punten n en $n+1$, $W_n(x)$ de benadering van $\Phi'(z)$ tussen de punten n en $n+1$, a de maaswijdte van het netwerk, en x de abscis tussen de punten n en $n+1$, die varieert van 0 tot a. De afgeleide Φ' in het punt n wordt volgens (5b) benaderd door de helling van de verbindingslijn tussen Φ_{n+1} en Φ_{n-1}, zoals in fig. 10*b* met behulp van een willekeurige kromme en een overdreven grote maaswijdte wordt geïllustreerd.

Wanneer we de formules (5) in de volgende vorm schrijven, wordt duidelijk hoe U_n en W_n met de rekenmachine kunnen worden verkregen:

$$U_n = \Phi_n + \int_0^{x/a} (\Phi_{n+1} - \Phi_n)\,\mathrm{d}z,$$

$$W_n = \frac{\Phi_{n+1}-\Phi_{n-1}}{2a} + \int_0^{x/a} \frac{\Phi_{n+2}-\Phi_{n+1}-\Phi_n+\Phi_{n-1}}{2a}\,\mathrm{d}z.$$

De schakeling waarmee U_n wordt berekend, wordt in een volgende paragraaf apart behandeld.

Aan de formule voor W_n kan men zien dat het nodig is dat tegelijkertijd de spanningen Φ_{n-1}, Φ_n, Φ_{n+1}, Φ_{n+2} aan de rekenmachine worden toege-

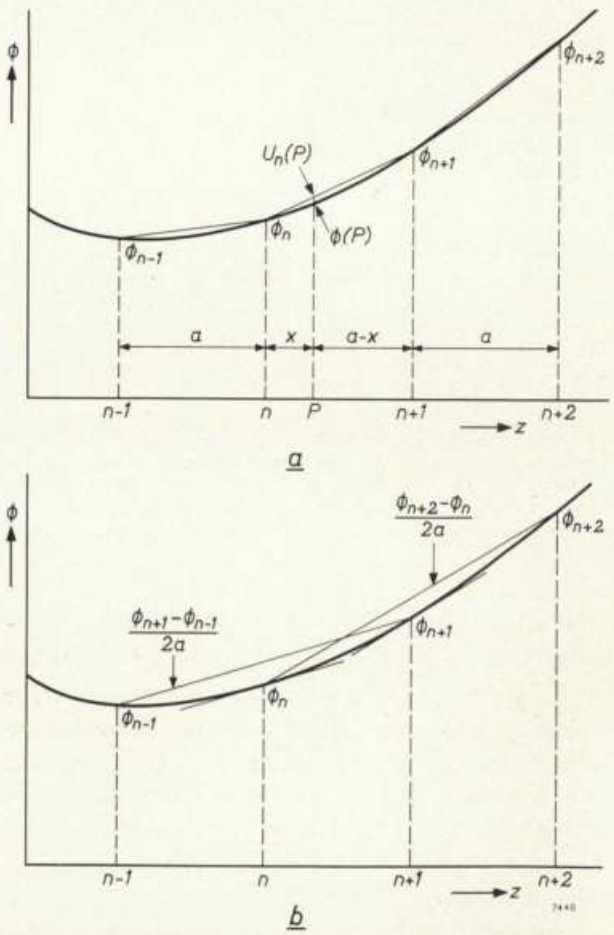


Fig. 10. *a*) Lineaire benadering van Φ en *b*) van Φ'. Tussen de punten n en $n+1$ benaderen we Φ' doordat we de helling van de verbindingslijn $(n-1,\ n+1)$ lineair laten toenemen tot de helling van $(n,\ n+2)$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voerd gedurende de tijd dat de z-coördinaat tussen de punten n en $n+1$ wordt doorlopen. Dit gelijktijdig overbrengen van de vier opeenvolgende spanningen gebeurt met behulp van een telefoonkiezer, waarvan in *fig. 11* een foto en in *fig. 12* het schakelschema is weergegeven. De schakelarmen zijn op één as gemonteerd, zodat ze gelijktijdig verspringen. In de rekenmachine wordt een sinusvormige spanning gegenereerd met een periode van 1 seconde, en een afzonderlijke schakeling geeft na elke periode een spanningsstoot af die de kiezer een stap doet verspringen. Zodoende wordt de as op het netwerk afgetast met een snelheid van één maasafstand per seconde. Nu is de schakeling fig. 8 zodanig gedimensioneerd dat bij het oplossen van de differentiaalvergelijking de z-as wordt doorlopen met een snelheid die eveneens overeenkomt met één maasafstand per seconde. Het genoemde tijdsverband tussen het aftasten van het netwerk en het doorlopen van de z-as bij het oplossen wordt zo door de sinusvormige spanning tot stand gebracht.

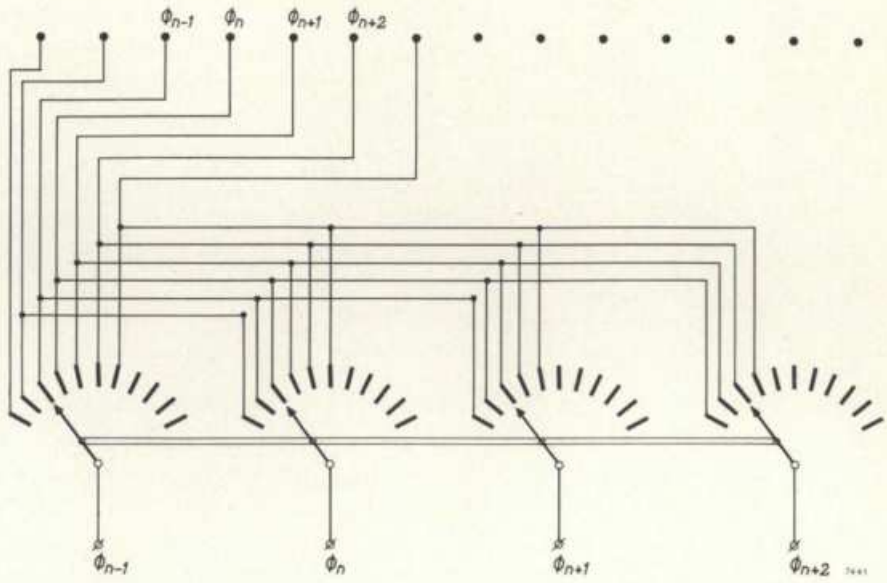


Fig. 12. Het schakelschema van de telefoonkiezer. Voor de duidelijkheid zijn de contacten niet alle getekend. De rij punten bovenaan zijn een aantal aspunten van het netwerk.

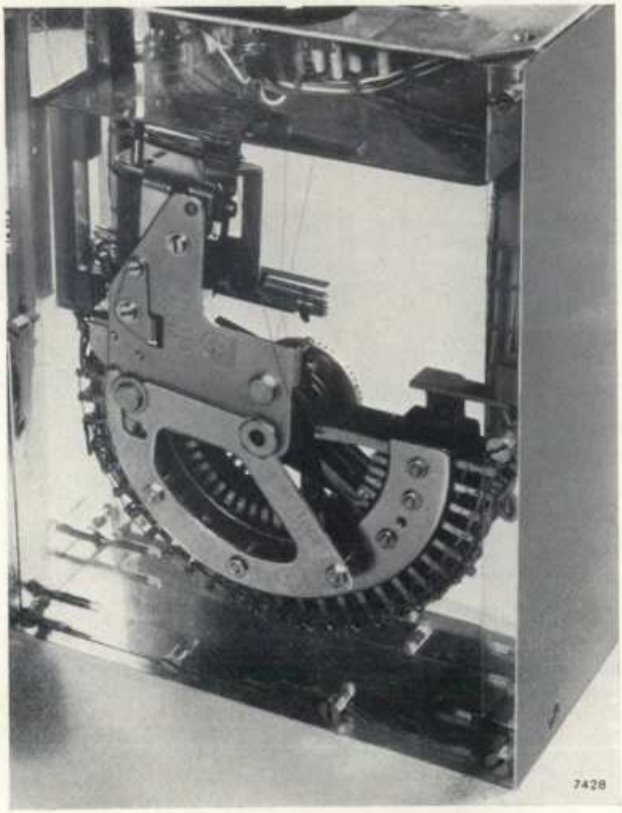


Fig. 11. De telefoonkiezer met vier schakelarmen (hij heeft er vijf, doch slechts vier worden gebruikt). Elke contactenboog bevat 26 beschikbare contacten. Er zijn tweemaal vier (vijf) contactenbogen op elkaar gestapeld, en de vier schakelarmen, die op eenzelfde as zijn gemonteerd, zijn zo geconstrueerd dat ze bij elke omwenteling 52 punten aftasten. De kiezer is opgehangen in een met olie gevulde bak van doorzichtige kunststof met de afmetingen $12 \times 19 \times 23$ cm.

De vier door de kiezer afgetaste spanningen worden aan de schakeling *fig. 13* toegevoerd, die de interpolatie tussen de punten n en $n+1$ uitvoert.

Op het tijdstip waarop de x-y-schrijver de baan tussen $n+1$ en $n+2$ begint te tekenen, verspringt de kiezer naar de volgende stand, zodat dan de spanningen Φ_n, Φ_{n+1}, Φ_{n+2}, Φ_{n+3} aan de schakelingen worden toegevoerd en $W_{n+1}(x)$ berekend wordt. Op het moment van verspringen wordt de condensator van de integrator (fig. 13) ontladen, zodat de schakeling met een schone lei aan de interpolatie tussen $n+1$ en $n+2$ kan beginnen.

Tegenkoppeling van het netwerk

Volgens fig. 13 worden de netwerkpunten die door de telefoonkiezer ingeschakeld zijn, verbonden met optellers. In fig. 4 kan men zien dat daardoor deze netwerkpunten via weerstanden (R_1, R_2) van ongeveer 1 MΩ verbonden worden met een punt (p)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

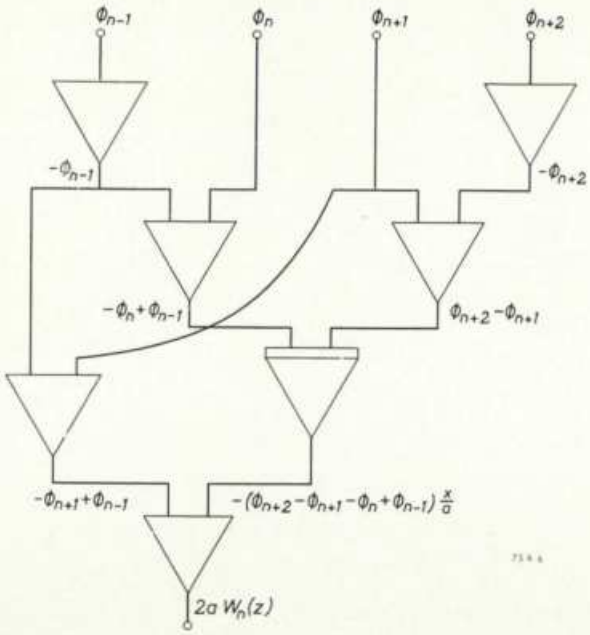


Fig 13. Schakeling die W_n berekent als benadering van Φ' tussen de punten n en $n+1$.

dat een vaste potentiaal, nl. aardpotentiaal, heeft. De potentiaal Φ die voorkomt in de vergelijking van Picht wordt gerekend ten opzichte van de potentiaal in het punt waar de elektronen met snelheid nul vertrekken. Wanneer we deze „katodepotentiaal" eveneens gelijk maakten aan de vaste aardpotentiaal, dan zou een punt van het netwerk dat de spanning Φ heeft, belast worden met een stroom Φ/R_1, waardoor de spanning in dat punt aanzienlijk kan worden beïnvloed.

Om dit tegen te gaan, is het netwerk met zijn spanningsbron „zwevend" gemaakt en wordt een zodanige tegenkoppeling toegepast dat de vier punten waarvan de potentiaal gemeten wordt, en niet de „katode", zich gemiddeld op aardpotentiaal bevinden. Dit wordt bewerkstelligd met behulp van de schakeling *fig. 14*. De operationele versterker A is tegengekoppeld via de weerstanden van het netwerk, waardoor de spanning in het punt *1* nagenoeg gelijk nul is. Op het tijdstip dat de telefoonkiezer juist is versprongen, is $x = 0$, zodat dan de spanning van *2* gelijk nul is. Hieruit volgt dat ook de spanning van *3* gelijk nul moet zijn. Dit wordt bewerkstelligd door de versterker A, die een zodanige, bij alle netwerkspanningen op te tellen, tegenkoppelspanning U_t levert dat $\Phi_n + U_t = 0$. Bij het verstrijken van de tijd wordt de spanning in *2* groter en (door verandering van U_t) de spanning in *3* in dezelfde mate kleiner. Op deze manier blijven de waarden van Φ_n en Φ_{n+1} gedurende de desbetreffende stand van de telefoonkiezer in de buurt van de aardpotentiaal, en er wordt voorkomen dat er te grote stromen van het netwerk worden afgenomen.

De schakeling is nu zodanig gekozen (met name door het erin opnemen van de opteller en de integrator) dat de tegenkoppelspanning U_t juist het tegengestelde is van U_n, waarmee $\Phi(z)$ tussen n en $n+1$ wordt benaderd. Wanneer de spanning van *1* gelijk nul is, geldt immers:

$$\Phi_n + U_t + (\Phi_{n+1} - \Phi_n)\, x/a = 0,$$

waaruit: $$-U_t = \Phi_n + (\Phi_{n+1} - \Phi_n)\, x/a,$$

hetgeen volgens (5a) gelijk is aan $U_n(x)$.

Op W_n heeft deze tegenkoppeling geen invloed, aangezien bij de bepaling van W_n slechts gerekend wordt met spanningsverschillen: deze zijn onafhankelijk van het potentiaalniveau waarop het netwerk zich bevindt.

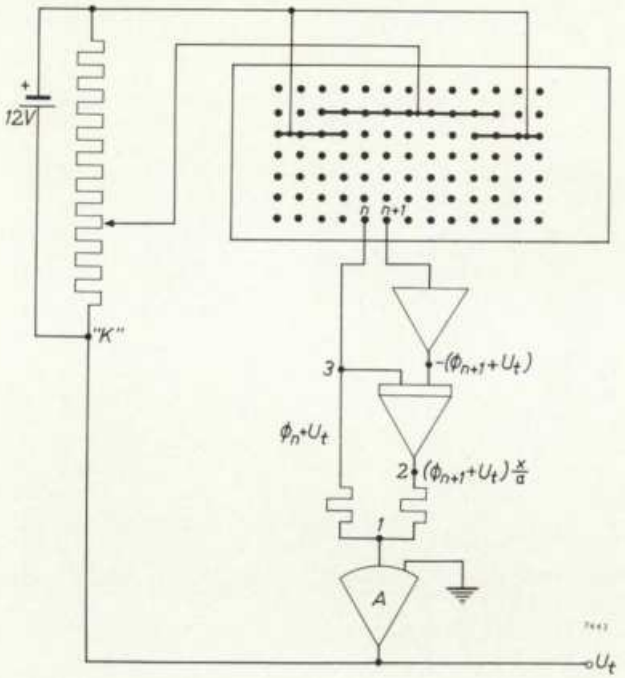


Fig. 14. De operationele versterker A is tegengekoppeld via de weerstanden van het netwerk en levert een zodanige tegenkoppelspanning U_t dat niet de „katode" van het netwerk (punt „K") op nulpotentiaal blijft, doch het gemiddelde van de potentialen in de punten n en $n+1$. Hierdoor wordt voorkomen dat de rekenmachine stromen van het netwerk afneemt die de potentialen van de netwerkpunten beïnvloeden.
De schakeling is zodanig gekozen dat $-U_t$ juist gelijk is aan U_n, waarmee $\Phi(z)$ tussen n en $n+1$ wordt benaderd.
De spanningen van de punten n en $n+1$ worden ook naar de desbetreffende punten van fig. 13 geleid. De telefoonkiezer is niet getekend.

Zo leveren de schakelingen fig. 13 en 14 de waarden U_n en W_n, waarmee Φ en Φ' benaderd worden door continue functies, bestaande uit rechte lijnstukken. De rekenmachine berekent daaruit $(W_n/U_n)^2$ als benadering van $(\Phi'/\Phi)^2$, welke functie aan de vermenigvuldiger in fig. 8 kan worden toegevoerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De nauwkeurigheid van de potentiaalmeting

Bij de berekening van het quotiënt W_n/U_n met behulp van de „deler" (fig. 7) wordt de deelverhouding op de beide potentiometers bepaald door U_n. Om het gehele gebied van de potentiometers te benutten, wordt U_n eerst met een zó groot getal vermenigvuldigd dat zijn maximale waarde slechts weinig kleiner is dan de referentiespanning V_r. (Door dit getal moet in een ander punt van de schakeling weer worden gedeeld.) Indien nu de minimale waarde van U_n zeer veel kleiner is dan zijn maximale waarde, zal de deler op het moment dat die minimale waarde voorkomt, zeer onnauwkeurig werken, aangezien dan slechts enkele windingen van de potentiometer worden gebruikt. Een redelijke nauwkeurigheid wordt nog bereikt bij een verhouding tussen de maximale en minimale waarde van 20 : 1.

We zullen nu nog nagaan welke fout veroorzaakt wordt doordat we Φ en Φ' benaderen door U_n en W_n.

In een bepaalde stand van de telefoonkiezer worden de spanningen Φ_{n-1} tot en met Φ_{n+2} aan de machine toegevoerd. We stellen ons de vraag: hoeveel wijkt de voor het punt P (fig. 10*a*) toegevoerde spanning $U_n(P)$ af van de spanning $\Phi(P)$ die volgt uit de derdegraadskromme die we door de vier punten Φ_{n-1} tot en met Φ_{n+2} kunnen trekken? Weliswaar is ook deze waarde niet gelijk aan de werkelijke waarde van $\Phi(z)$ in het punt P, maar in ieder geval zal het een betere benadering zijn. Voor het berekenen van de fouten in $U_n(P)$ en $W_n(P)$ nemen we daarom aan dat die derdegraadskromme het werkelijke verloop van $\Phi(z)$ weergeeft. Dit komt erop neer dat $\Phi(z)$ kan worden weergegeven door de eerste vier termen van de taylorreeks voor de omgeving van P (coördinaat z_p):

$$\Phi(z)=\Phi(P)+(z-z_p)\,\Phi'(P)+\tfrac{1}{2}(z-z_p)^2\Phi''(P)+\tfrac{1}{6}(z-z_p)^3\Phi'''(P).$$

Door deze formule toe te passen voor de punten $n-1$, n, $n+1$, $n+2$ vinden we, als we nog stellen $z_p - z_n = x$:

$$\begin{aligned}
\Phi_{n-1}&=\Phi(P)-(a+x)\Phi'(P)+\tfrac{1}{2}(a+x)^2\Phi''(P)-\tfrac{1}{6}(a+x)^3\Phi'''(P),\\
\Phi_{n}&=\Phi(P)-x\,\Phi'(P)+\tfrac{1}{2}x^2\Phi''(P)-\tfrac{1}{6}x^3\Phi'''(P),\\
\Phi_{n+1}&=\Phi(P)+(a-x)\Phi'(P)+\tfrac{1}{2}(a-x)^2\Phi''(P)+\tfrac{1}{6}(a-x)^3\Phi'''(P),\\
\Phi_{n+2}&=\Phi(P)+(2a-x)\Phi'(P)+\tfrac{1}{2}(2a-x)^2\Phi''(P)+\tfrac{1}{6}(2a-x)^3\Phi'''(P).
\end{aligned}$$

Door de hier gevonden uitdrukkingen voor Φ_{n-1}, Φ_n, Φ_{n+1}, Φ_{n+2} te substitueren in de vergelijkingen (5a) en (5b), vinden we een verband tussen de benaderingen $U_n(P)$, $W_n(P)$ en de „werkelijke "waarden $\Phi(P)$ en $\Phi'(P)$:

$$\begin{aligned}
U_n(P) &= \Phi(P) + C_1(x),\\
W_n(P) &= \Phi'(P) + C_2(x).
\end{aligned}$$

De beide correctietermen, die nog een functie van x zijn, worden gegeven door:

$$\begin{aligned}
C_1(x) &= \tfrac{1}{2}\,x(a-x)\,\Phi''(P) + \tfrac{1}{6}\,x(a-2x)(a-x)\Phi'''(P),\\
C_2(x) &= \tfrac{1}{6}\,(a^2+3ax-3x^2)\,\Phi'''(P).
\end{aligned}$$

We hebben voor een bepaalde elektrodenconfiguratie [11]) de waarden van C_1/Φ en C_2/Φ' berekend. We vonden voor de maximale waarden hiervan:

$$C_1/\Phi = 0{,}002 \quad \text{en} \quad C_2/\Phi' = 0{,}003,$$

zodat men een maximale fout van $0{,}2\%$ in U_n heeft en van $0{,}3\%$ in W_n. Deze fouten moeten we vergelijken met de potentiaalfouten die ontstaan door de eindige maaswijdte van het netwerk. Voor een bepaalde elektrodenconfiguratie, gerealiseerd op drie verschillende schalen *I*, *II*, *III* en dus met drie verschillende maasgetallen [12]), is deze fout bepaald door Francken [2]). Ons elektrodenmodel op het netwerk komt, wat betreft het maasgetal, overeen met de genoemde configuratie op schaal *I*, waarvoor de gevonden fout in de potentiaal ongeveer 1% bedraagt. Men ziet dus dat de interpolatie van Φ en Φ' voldoende nauwkeurig is. Overigens kunnen we de nauwkeurigheid nog opvoeren door de door Francken genoemde spiegeling toe te passen. Omdat hierbij slechts de helft van de elektrodenconfiguratie wordt afgebeeld, kan het model nog tweemaal worden vergroot. In dat geval zou ons elektrodenmodel overeenkomen met zijn model op schaal *III*, waarvoor een fout van $0{,}5\%$ wordt gegeven. De fouten C_1/Φ en C_2/Φ' zijn dan ook kleiner, zodat de lineaire benadering geoorloofd blijft.

Sferische aberratie

Wanneer met de beschreven opstelling een aantal paraxiale banen van elektronen in het veld van een elektrostatische lens zijn bepaald, dan kunnen hieruit de posities van de brandpunten en van de hoofdvlakken worden afgeleid, waarmee het gedrag van de lens wat betreft de focussering beschreven is.

Zoals een optische lens, heeft ook een elektronenlens afbeeldingsfouten (aberraties). Het is daarom van groot praktisch belang dat met deze opstelling ook aberraties kunnen worden bepaald. De belangrijkste aberratie die optreedt bij elektronenbundels in elektronenkanonnen van televisiebeeldbuizen is de sferische aberratie (*fig. 15*). Wanneer men nl. een punt gelegen op de as van de lens afbeeldt, is dit de enige aberratie die optreedt. De grootte van het aberratieschijfje wordt gegeven door [13]):

$$\Delta r_0 = \frac{5}{64} f r^3 \sqrt{\Phi_0} \int_{-\infty}^{z(F)} \frac{R_n^4}{\sqrt{\Phi}} \left[\left(\frac{\Phi''}{\Phi}\right)^2 - \frac{101}{120}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^4 + \frac{13}{3}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^3 \frac{R_n'}{R_n} - \frac{6}{5}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^2 \left(\frac{R_n'}{R_n}\right)^2 \right] dz. \quad (6)$$

Hierin is Φ_0 de potentiaal van de equipotentiaalruimte waaruit de evenwijdige bundel vertrekt, $z(F)$ de coördinaat van het brandpunt en f de bijbehorende brandpuntsafstand, en $R_n(z)$ een genormaliseerde paraxiale baan, nl. degene die met

[11]) Twee gelijke cilinders die op zeer kleine onderlinge afstand in elkaars verlengde staan en waarbij de verhouding der spanningen is als 20 : 1. Hierboven is uiteengezet dat dit de maximale verhouding is waarvoor de nauwkeurigheid van de rekenmachine nog voldoende is.

[12]) Onder het maasgetal verstaat men één der afmetingen van het elektrodensysteem gedeeld door de maaswijdte. Welke afmeting men hiervoor kiest, is onverschillig, mits men zich bij vergelijkingen van modellen op verschillende schaal aan die keuze houdt.

[13]) Zie b.v. W. Glaser, Grundlagen der Elektronenoptik, Springer, Wenen 1952, blz. 371 en 675. Men verkrijgt de formule (6) door in de daar gegeven formule de substitutie van Picht toe te passen. De formule geldt wanneer voorwerp en beeld zich in een veldvrije ruimte bevinden en wanneer de voorwerpsafstand veel groter is dan de beeldafstand. Indien de voorwerpsafstand veel kleiner is dan de beeldafstand, zoals bij beeldbuizen het geval is (fig. 1), dan blijft de integraal hetzelfde, maar de factor ervóór verandert.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

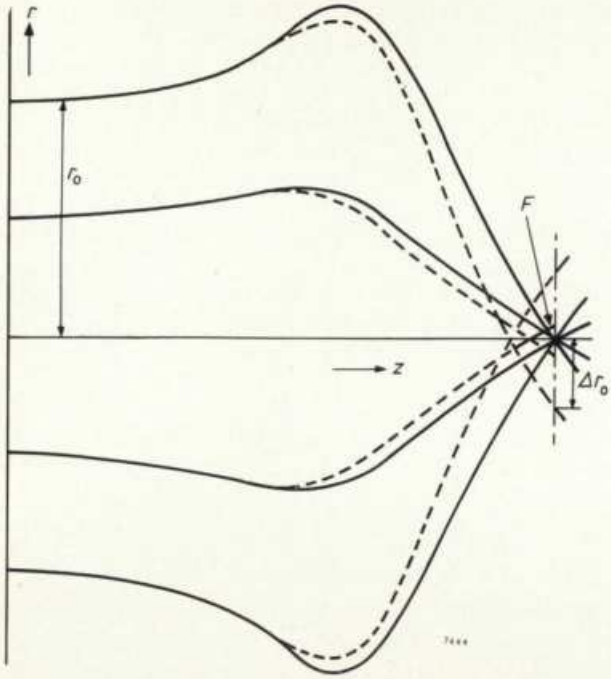


Fig. 15. Het optreden van sferische aberratie bij focussering van elektronen. De getrokken lijnen stellen de theoretische paraxiale banen voor, die alle de as snijden in het brandpunt. De gestippelde krommen zijn de werkelijke banen wanneer zich sferische aberratie voordoet. De banen die het meest naar buiten zijn gelegen, snijden de as het dichtst bij de lens. Ter plaatse van het brandpunt ontstaat een aberratieschijfje met straal Δr_0.

$R = 1$ evenwijdig aan de as uit $-\infty$ komt. (De normalisatie maakt van R_n, evenals we bij V hebben gezien, een dimensieloze grootheid.)

Met behulp van de rekenmachine kan Δr_0 berekend worden. We hebben daarbij ook Φ'' nodig, waarvoor we uitgaan van het verschil tussen $(\Phi_{n+2} - \Phi_{n+1})$ en $(\Phi_n - \Phi_{n-1})$. We beschikken nu weliswaar niet over een continue kromme, maar midden in het interval n tot $n+1$ heeft Φ'' nagenoeg de juiste waarde. Voor het berekenen van de integraal wordt het netwerk weer op dezelfde manier afgetast. De uitkomst van de integraal, die tot op $10^0/_0$ nauwkeurig is, kan op een voltmeter worden afgelezen.

Verdere mogelijkheden

Er zijn, naast hetgeen we hierboven beschreven hebben, nog een aantal toepassingmogelijkheden, waarvan we er enkele willen noemen.

Bij grotere bundelstromen kan de invloed van de onderlinge afstoting der elektronen op de banen niet verwaarloosd worden. Het blijkt [14]) dat we dan aan het linkerlid van de vergelijking van Picht de term

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 \sqrt{2e/m}} \times \frac{I}{\Phi R}$$

moeten toevoegen, waarin I de bundelstroom is, e de lading en m de massa van een elektron. De schakeling in de rekenmachine moet dienovereenkomstig worden gewijzigd. Bij nog grotere bundelstromen gaat de ruimtelading, veroorzaakt door de elektronen, de potentiaalverdeling beïnvloeden. Dit kan in rekening worden gebracht door op de juiste manier stromen aan de netwerkpunten toe te voeren.

Ook de lenswerking van een rotatiesymmetrisch magnetisch veld laat zich met dezelfde opstelling berekenen, mits dit veld beschreven kan worden met een potentiaalfunctie. De paraxiale baanvergelijking is in dit geval natuurlijk anders dan bij elektrostatische velden [14]) en de schakeling van de rekenmachine moet daaraan worden aangepast.

Als een elektron beweegt in een tegelijkertijd aanwezig elektrostatisch veld en een rotatiesymmetrisch magnetisch veld, kan men eveneens de baan berekenen. Men heeft daarvoor *twee* netwerken nodig, die resp. de elektrostatische en de magnetische potentiaalverdeling leveren, en twee telefoonkiezers, bij elk netwerk één, die tegelijkertijd de aspotentialen aftasten. De baan wordt weer met een analogonrekenmachine berekend op grond van de paraxiale baanvergelijking [14]) voor gecombineerde elektrische en magnetische velden.

Ten slotte vermelden we het geval dat men elektronenbanen wil bepalen in potentiaalvelden die gedurende de tijd dat het elektron het veld doorloopt, veranderen. Om dit bij onze opstelling in rekening te brengen, moet men de spanning van de elektroden met de tijd laten veranderen. Het best kan men het netwerk dan voeden met een spanning die door de rekenmachine zelf gegenereerd wordt en volgens een bepaalde functie verloopt.

Samenvatting. Voor het doelmatig ontwerpen van bepaalde rotatiesymmetrische elektrodensystemen (zoals de focusseringslens voor een televisiebeeldbuis) dient men te beschikken over een gedetailleerde kennis van de paraxiale banen van de elektronen. Een analogon-rekenmachine van het type PACE kan de banen berekenen als oplossingen van een differentiaalvergelijking, de paraxiale baanvergelijking van Picht. Om het berekenen geheel automatisch te doen verlopen, wordt het potentiaalverloop langs de as van de elektrodenconfiguratie, zoals dat verkregen wordt op een weerstandsnetwerk, door middel van een vierarmige telefoonkiezer afgetast en rechtstreeks aan de rekenmachine toegevoerd. In het artikel wordt, na een bespreking van de belangrijkste bouwelementen van een analogon-rekenmachine, uiteengezet hoe de machine door interpolatie uit de discrete potentiaalwaarden, die het weerstandsnetwerk levert, een continue functie afleidt, en hoe verder het oplossen van de differentiaalvergelijking in zijn werk gaat. Er volgt een beschouwing over de nauwkeurigheid van de genoemde interpolatie. Met dezelfde opstelling kan men de sferische aberratie van de elektronenlens bepalen.

---

[14]) Zie het aangehaalde boek [13]), blz. 142.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

2935: W. Duyfjes: Interfacial phenomena in pesticide application (Pest Technol. **2**, 239-243, 1960, no. 11).

Vele pesticiden (chemische middelen ter bestrijding van schadelijke insekten, mijten, schimmels en onkruiden) worden gebruikt met water als draagstof. Aangezien ze meestal niet in water oplosbaar zijn, moeten ze als emulsie of suspensie gebruikt worden. Enige fysische problemen die zich bij het zg. formuleren van zulke pesticiden voordoen, worden besproken. Zie ook Philips techn. T. **19**, 170, 1957.

2936: E. W. Gorter: Some structural relationships of ternary transition metal oxides (XVII. Internationaler Kongress für reine und angewandte Chemie, München 30 aug. - 6 sept. 1959, deel I, blz. 303-328, Verlag Chemie, Weinheim 1960).

De oxydes van metalen uit de eerste overgangsreeks zijn veel bestudeerd, omdat ze allerlei technische toepassingen hebben. In dit artikel worden alleen verbindingen van de types B_nO_p en $A_mB_nO_p$ besproken, waarin B een kation voorstelt dat in de holten van een dichte bolstapeling van zuurstofionen een plaats kan vinden, zoals de ionen der overgangsmetalen, en A een kation dat hiervoor te groot is. Een nieuwe methode om kristalstructuren te beschrijven, wordt besproken. Bij deze methode denkt men het kristal door middenloodvlakken tussen kristallografisch equivalente of chemische gelijke atomen verdeeld in een aantal blokken (die in het tweede geval niet allemaal identiek zijn). Deze methode wordt geïllustreerd door alle manieren te tonen waarop een anion in dichtste bolstapeling door kationen in 6-coördinatie omringd kan worden, en de structuren te bespreken die zo worden verkregen.

De mogelijkheden om eenvoudige oxydes door substitutie en vorming van superstructuren te veranderen, worden besproken aan de hand van de keukenzout-, de spinel-, de korund- en de rutielstructuur. Een aantal bestaande verbindingen $A_mB_nO_p$ worden getoond in een A-B-O diagram. De verwantschap tussen de structuren van een aantal verbindingen rondom het punt ABO_3, en die tussen een aantal verbindingen $A_mB_nO_p$ in de buurt van de punten B_2O_3 en B_3O_4, wordt besproken.

2937: J. H. Spaa: A rapid indicating instrument for the stepwise measurement of airdust radioactivity (Health Physics **4**, 25-32, 1960).

Beschrijving van een instrument voor de snelle detectie van verontreiniging van de lucht met radioactief stof. Het instrument is reeds in publikatie no. **2823a** beschreven. Het artikel bevat bovendien een bespreking van de met het instrument opgedane ervaring.

2938: F. K. Lotgering: Topotactical reactions with ferrimagnetic oxides having hexagonal crystal structures, II (J. inorg. nucl. Chem. **16**, 100-108, 1960, no. 1/2).

Als een poedermengsel van oxydes uit het systeem BaO-MeO-Fe_2O_3 (waarin Me = Ca, Ni, Zn enz.) *voor een deel* bestaat uit een oxyde dat magnetisch richtbaar is, terwijl de rest van het poeder dit niet is, dan blijkt — indien men dat deel gericht heeft — na verhitten in vele gevallen een reactieprodukt te zijn ontstaan dat bestaat uit een eenfazig oxyde dat *in zijn geheel* is gericht. Voor een dergelijke reactie is in een eerdere publikatie (no. **2707**) de naam „topotactische reactie" ingevoerd. Thans is een nader onderzoek ingesteld naar het mechanisme van enkele topotactische reacties, benevens naar de invloed van de methode van sinteren op de mate waarin het eindprodukt gericht is. Zie ook Philips techn. T. **20**, 367, 1958.

2939: J. N. Walop, Th. A. C. Boschman en J. Jacobs: Affinity of N-acetylneuraminic acid for influenza virus neuraminidase (Biochim. biophys. Acta **44**, 185-186, 1960, no. 1).

Voorlopige mededeling, waarin een nieuwe bepalingsmethode van neuraminidase-activiteit wordt beschreven. Het systeem influenzavirus en N-acetylneuraminyl-lactose blijkt de kinetica van Michaelis-Menten te volgen. Er wordt aangetoond dat N-acetylneuraminezuur concurrerend remt; de K_i wordt vergeleken met de K_m van het substraat, waarin het N-acetylneuraminezuur ketosidisch aan lactose is gebonden.

2940: W. Albers en J. Th. G. Overbeek: Stability of emulsions of water in oil, III. Flocculation and redispersion of water droplets covered by amphipolar monolayers (J. Colloid Sci. **15**, 489-502, 1960, no. 6).

Door eenvoudige berekeningen wordt aangetoond dat emulsies van water in olie niet gestabiliseerd kunnen worden door middel van een geadsorbeerde laag van amfipolaire moleculen met een dikte van 20 Å (vele stabilisatoren kunnen geen dikkere laag vormen), zodat de emulsie uitvlokt. Men mag verwachten dat zo'n uitgevlokte emulsie weer gedispergeerd wordt door middel van niet al te grote afschuivingskrachten. Uit viscositeitsmetingen blijkt dat dit inderdaad het geval is: boven een zekere kritische waarde wordt de afschuivingssnelheid namelijk een lineaire functie van de afschuivingskracht. Uit deze kritische waarde van de afschuivingssnelheid kan men de vanderwaals-constante A berekenen. Men vindt hiervoor de lage waarde $A = 0{,}4 \times 10^{-14}$ erg.

2941: J. L. Meijering: Hardening by internal oxidation as a function of velocity of the oxidation boundary (Trans. Metall. Soc. AIME **218**, 968-971, 1960, no. 6).

De hardheid van cilinder- of bolvormige metaalmonsters die door inwendige oxydatie gehard zijn, neemt van buiten naar binnen eerst af, maar stijgt weer als men het midden nadert. Dit is in overeenstemming met de theorie dat de hardheid hoofdzakelijk bepaald wordt door verandering van de snelheid waarmee de oxydatiegrens voortschrijdt, welke snelheid de fijnheid van verdeling van het oxyde bepaalt.

2942: H. J. L. Trap en J. M. Stevels: Conventional and invert glasses containing titania. Part 2 (Phys. Chem. Glasses **1**, 181-188, 1960, no. 6).

Onderzoek van de variatie in de diëlektrische eigenschappen van PbO-houdende silicaatglazen als de verschillende componenten door TiO_2 vervangen worden. De waargenomen effecten kunnen heel goed verklaard worden aan de hand van de in een vroegere publikatie (**2906**) besproken opvattingen omtrent het gedrag van titaniumionen in glas. Het toevoegen van titanium heeft meestal een verbetering van de diëlektrische eigenschappen tot gevolg. De infraroodspectra van deze titaniumglazen zijn ook in overeenstemming met de bovengenoemde opvattingen. Zie ook Philips techn. T. **22**, 312-323, 1960 (no. 9/10).

2943: E. Havinga, R. J. de Kock en M. P. Rappoldt: The photochemical interconversions of provitamin D, lumisterol, previtamin D and tachysterol (Tetrahedron **11**, 276-284, 1960, no. 4).

Deze publikatie geeft een overzicht van de in de loop der laatste tien jaar door de auteurs en hun medewerkers verrichte onderzoekingen over de foto-isomerisatie die bij de synthese van vitamine D (ergocalciferol) plaatsvindt. Er wordt een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nieuw reactieschema voorgesteld, en de quantumrendementen van de verschillende reacties bij bestraling met golflengte 2537 Å zijn vastgesteld. De samenstelling van het reactiemengsel in de quasistationaire toestand is voor verschillende golflengten berekend uit de bovengenoemde gegevens en de absorptiecoëfficiënten van de diverse isomeren bij deze golflengte. Metingen bij 2537 Å zijn in goede overeenstemming met de berekende waarden. Tevens geven de berekeningen een verklaring van het vroeger door andere onderzoekers gevonden verband tussen de golflengte van het gebruikte licht en de opbrengst van bepaalde produkten. De emissiespectra van de verschillende foto-isomeren zijn gemeten bij 80 °K. Deze metingen steunen de onderstelling dat de foto-isomerisaties verlopen via aangeslagen singlettoestanden (en niet via tripletttoestanden, zoals vroeger is aangenomen). Het verdere mechanisme van de fotoreacties wordt kort besproken.

2944: G. Hardeman: La polarisation dynamique nucléaire dans du polytetrafluoréthylène irradié (Bull. Group. Inf. mut. AMPERE **9,** no. spéc., 669-673, 1960).

Zie **R 410.**

2945: S. van Houten: Semiconduction in $Li_xNi_{(1-x)}O$ (Phys. Chem. Solids **17,** 7-17, 1960, no. 1/2).

NiO is een isolator, die geleidend wordt als men een oxyde van een eenwaardig metaal zoals Li_2O toevoegt. Dit gedrag kan worden verklaard door een schema van energieniveaus aan te nemen met bezette gelokaliseerde Ni^{3+}-niveaus die ongeveer 5 eV onder lege gelokaliseerde Ni^{+}-niveaus liggen. Als het rooster lithium bevat, zijn de Li^{+}-ionen door Ni^{3+}-ionen gecompenseerd, zodat Li^{+}-Ni^{2+}-acceptorniveaus ontstaan, ca. 0,03 eV boven de Ni^{2+}-niveaus. De elektrische geleiding door „gaten" kan worden beschreven als de thermisch geactiveerde diffusie van gaten van het ene nikkelion naar het andere. De activeringsenergie voor deze geleiding hangt samen met „zelfvangst" ten gevolge van de polarisatie die het bewegende gat zelf veroorzaakt. De berekening van het energieschema wordt uitvoerig beschreven. Metingen van het thermo-elektrische effect en van de soortelijke weerstand als functie van temperatuur en Li-gehalte worden besproken aan de hand van dit model. Uit deze metingen volgt dat de zuurstofband, die ca. 5 eV onder de Ni_2^{+}-niveaus ligt, niet bijdraagt tot de geleiding.

2946: H. Koelmans: Association and dissociation of centres in luminescent ZnS-In (Phys. Chem. Solids **17,** 69-79, 1960, no. 1/2).

Onderzoek naar de fluorescentie van zinksulfide dat alleen indium als verontreiniging bevat. De bereiding geschiedde door zuiver zinksulfide met het indium (toegevoegd als oplossing of als vast $ZnIn_2S_4$) bij 1200 °C te stoken in een atmosfeer van H_2S. Uit röntgenanalyses is gebleken dat het indiumgehalte maximaal 10^{-2} gramatoom per mol zinksulfide bedraagt. De fluorescentie is maximaal bij bestraling met golflengte 3650 Å. Het emissiespectrum vertoont banden bij 6200, 5350 en 4700 Å. Uit de metingen is afgeleid aan welke overgangen deze banden moeten worden toegeschreven. Na hernieuwde verhitting op 600 °C blijkt zich bij kamertemperatuur geen luminescentie meer voor te doen. Dit komt door associatie van centra; de geassocieerde centra werken als doofcentra. Bij lage temperaturen wordt de fosforescentie in hoge mate gestimuleerd door bestraling met banden bij $\lambda = 1{,}8\ \mu$ en $\lambda < 1{,}2\ \mu$.

2947: W. Nijenhuis: Benaderingsmethode van overdrachtsfuncties, waarbij een rimpel zowel in het doorlaatgebied als in het dempingsgebied wordt voorgeschreven (T. Ned. Radiogenootschap **25,** 297-306, 1960, no. 5/6).

Voor telefonie en andere doeleinden wenst men filters waarbij aan de rimpel van de overdrachtsfunctie in het doorlatings-, zowel als in het verzwakkingsgebied, benevens aan de doorlating zelf zekere eisen worden gesteld, terwijl ook de breedte van het overgangsgebied aan grenzen gebonden is. Zoals bekend, is de overdrachtsfunctie van een uit weerstanden, spoelen en condensatoren samengesteld filter altijd een gebroken rationale functie. Deze publikatie beschrijft een van Klinkhamer afkomstige methode om zo'n functie te vinden die aan de gestelde eisen voldoet. Daarbij wordt gebruik gemaakt van conforme afbeelding van het complexe frequentievlak door middel van elliptische functies. De methode wordt veraanschouwelijkt door middel van een vliesmodel voor de overdrachtsfunctie.

2948: M. J. Koopmans: Systemic fungicidal action of some 5-amino, 1 bis(dimethylamido)phosphoryl triazoles 1,2,4 (Meded. Landbouwhogesch. Opzoekingsstat. Gent **25,** 1221-1226, 1960, no. 3/4).

Een bespreking van de fungicide werking van de 3-pentyl- en de 5-fenylderivaten van 5-amino,1-bis(dimethylamino) fosforyltriazool 1,2,4. (Het 5-fenylderivaat is in de handel onder de naam „Wepsyn".) Deze groep van verbindingen heeft een duidelijke werking tegen meeldauwschimmels, voorkomende op bepaalde planten zoals appel, roos, gerst. Bij de twee bovengenoemde verbindingen wordt deze werking met name gevonden bij bespuiting van de bladeren van appel en gerst. De werking is vergelijkbaar met die van 2,4-dinitro-6-capryl-fenylcrotonaat (DNCPC). Een goede bescherming tegen aantasting door meeldauw is ook gevonden na toediening aan de wortels bij dezelfde soorten. In vitro is de activiteit veel kleiner dan die van DNCPC. Waarschijnlijk is hier sprake van een bij de waardplant geïnduceerde resistentie, waarbij de plant zowel via het blad als via de wortels door de chemische verbinding kan worden beïnvloed.

2949: W. J. Oosterkamp en C. Albrecht: Methods of evaluating the new instrumental systems for diagnostic radiology (9th int. congress of radiology, München 23-30 juli 1959, red. B. Rajewsky, blz. 1451-1460, Thieme, Stuttgart 1960).

Na een korte beschrijving van enige nieuwe instrumentale systemen voor röntgendiagnostiek (beeldversterking, röntgentelevisie en verschillende combinaties hiervan) volgt een bespreking van de invloed van het stralencontrast, de ruis en de onscherpte op de waarneming van kleine details in het uiteindelijke beeld.

2950: O. Reifenschweiler: Neutrons from small tubes. I. Philips tube: continuous or pulsed operation (Nucleonics **18,** 69-71, 1960, no. 12).

Beschrijving van een afgesmolten neutronenbuis die gedurende de laatste jaren is ontwikkeld in verband met het groeiende belang van de neutronenfysica in wetenschap en techniek. De buis is gebaseerd op de produktie van neutronen bij de reactie van deuterium met tritium, en produceert 3×10^8 n/s bij continue werking. De buis kan ook impulsgewijs werken en geeft dan een piek-neutronenflux van 3×10^{10} n/s. Hij bevat een ionenbron van Penning, een 100- à 200-kV-versneller, een in een zirconiumdraad geabsorbeerde voorraad deuterium en tritium om de deuterium- en tritiumdruk in de buis constant te houden, en een trefplaat, bestaand uit een op zilver gedampt titaniumlaagje waarin tritium wordt geschoten. Zo'n trefplaat vult zichzelf aan, zodat hij de levensduur van de buis niet begrenst. Zie ook het artikel van O. Reifenschweiler en K. Nienhuis in dit nummer, Philips techn. T. **23,** 341, 1961.

2951: F. L. H. M. Stumpers: Balth. van der Pol's work on nonlinear circuits (IRE Trans. on circuit theory **CT-7,** 366-367, 1960, no. 4).

Een overzicht van het baanbrekende werk van Van der Pol op het gebied van niet-lineaire netwerken (vergelijking van Van der Pol, relaxatietrillingen enz.) in het speciale nummer over dit gebied, waarvan Van der Pol bij zijn leven een der redacteuren geweest zou zijn, en dat nu aan zijn nagedachtenis is gewijd. (Zie voor een meer algemeen overzicht: Philips techn. T. **22,** 44-60, 1960.)

Verschenen is:

H. Zijl: Large size perfect diffusors (Philips' Technische Bibliotheek, 1960, 196 blz., 120 figuren, 49 grafieken).

Tweede druk (met kleine veranderingen) van het boek dat reeds besproken is in Philips techn. T. **15,** 345, 1953.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!